MÄRZ 2006 · € 6,90 (D/A)

AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

SUDOKU-Preisrätsel

COMPUTER-TRENDS

- Denkende Computer bis 2050?
- Morphware
- Nanoschaltkreise

www.spektrum.de

Schwerkraft – eine Illusion?

Gut möglich – sofern unsere Welt ein Hologramm ist

HIRNFORSCHUNG

Warum Männer anders denken als Frauen

TREIBHAUSGASE

Macht es Sinn, Kohlendioxid zu vergraben?

AUSSTERBEN

Die letzten Wildpferde

D6179E
13,50 sFr/ Luxemburg 8,– €

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Der große Unterschied

Liebe Spektrum-Leser,

über Unterschiede zwischen Männern und Frauen wird seit Menschengedenken geschrieben, gedichtet, geforscht – so viel, dass man meinen könnte, alles Wesentliche dazu sei bereits gesagt. Ein grober Irrtum: Gerade mit modernen bildgebenden Verfahren gelingt es Forschern, neue anatomische, kognitive und physiologische Differenzen etwa zwischen weiblichen und männlichen Hirnen zu diagnostizieren. Die Bedeutung solcher Wissenschaft hat medizinische Konsequenzen: etwa für die Behandlung von Depressionen, Schizophrenie oder Unfalltraumata, die geschlechtsspezifisch verschieden gehandhabt werden sollten. Auch beim Suchtverhalten leiten sich aus solchen Erkenntnissen neue Ansätze für differenzierte Therapien abhängiger Männer und Frauen her (S. 28).

Um den Treibhauseffekt zu bekämpfen, hat die Staatengemeinschaft im Kiotoprotokoll sich selbst zum Maßhalten beim Kohlendioxidausstoß verpflichtet – mit wenig Erfolg, wie sich längst abzeichnet. Die Weigerung der USA, sich diesem Abkommen anzuschließen, sowie der absehbare Aufstieg Chinas zu einem der kommenden Top-Ölverbraucher tauchen die Chancen für eine erfolgreiche Limitierung der anthropogenen Aufheizung der Erdatmosphäre in ein düsteres Licht.

Über technische Alternativen wird geforscht. So diskutiert Robert H. Socolow, Professor in Princeton, die Möglichkeit, Kohlendioxid aus den Abgasen von Kraftwerken herauszufiltern und unterirdisch zu vergraben. Das Verfahren klingt etwas verrückt, scheint aber technologisch machbar und aussichtsreich. Der studierte Physiker Socolow vertritt jedenfalls die Ansicht, dass es »erheblich dazu beitragen« könnte, »der globalen Erwärmung entgegenzuwirken« (S. 72).

Was halten Sie von dieser Idee? Auf unserer Onlineseite können Sie uns Ihre Meinung dazu einfach und schnell übermitteln: www.spektrum.de/co2. Solche Einladungen finden Sie ab jetzt regelmäßig auf der Doppelseite, um die wir das Inhaltsverzeichnis erweitert haben. Was es dort sonst noch gibt: Zugang zu Onlinedossiers, die wir für Sie zusammengestellt haben – diesmal aktuell zur Vogelgrippe –, aber ebenso Informationen zu Themen der jeweiligen Ausgabe. Daneben finden Sie auch Links zu frei zugänglichen Artikeln aus den anderen Magazinen der Spektrum-Familie.

Reinhard Breuer

INHALT

SPEKTROGRAMM

12 Künstliche Schnecke
Älteste Maya-Inschrift
Eier legende Spitzmaus
Werbetanz der Gene u. a.

15 **Bild des Monats**
Kosmischer Kreißsaal

FORSCHUNG AKTUELL

16 **Minitorpedos gegen Viren und Krebs**
RNA-Schnipsel als Stummschalter für unerwünschte Gene

23 **Im Raum der Möglichkeiten**
Warum uns die Welt dreidimensional erscheint

24 **Pflanzen geben Methan ab**
Im Interview beschreibt Frank Keppler seine überraschende Entdeckung

THEMEN

▶ 28 NEUROWISSENSCHAFTEN
Gehirn männlich / weiblich

▶ 36 TITELTHEMA PHYSIK
Schwerkraft – eine Illusion?

▶ 44 ARTENSCHUTZ
Die letzten wild lebenden Pferdearten drohen auszusterben

▶ SCHWERPUNKT COMPUTERTRENDS

54 SUPERCOMPUTER
Wirklich intelligente Rechner

60 NANODRÄHTE
Wie aus Gittern Schalter werden

66 MORPHWARE
Chamäleonchips für alles

▶ 72 KLIMASCHUTZ
Deponieren von Kohlendioxid im Boden – eine sinnvolle Option?

84 MEDIZINGESCHICHTE
Waren Klöster Horte der Heilkunde?

108 ESSAY
Vom Wert spekulativer Theorien in der Physik

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

SEITE 28

NEUROWISSENSCHAFTEN

Sein Hirn – ihr Hirn

Männer und Frauen sind gleich, aber eben nicht völlig, was das Gehirn anbelangt. Forscher, die den Unterschied ignorieren, riskieren irreführende Ergebnisse

ARTENSCHUTZ SEITE 44

Bedrohte Wildesel und Wildpferde

Nur sechs Arten der Equiden, der Pferde, haben in der Natur überlebt. Ohne Schutzprogramme würden sie bald aussterben

SEITE 72

KLIMASCHUTZ

Vergraben von Treibhausgasen

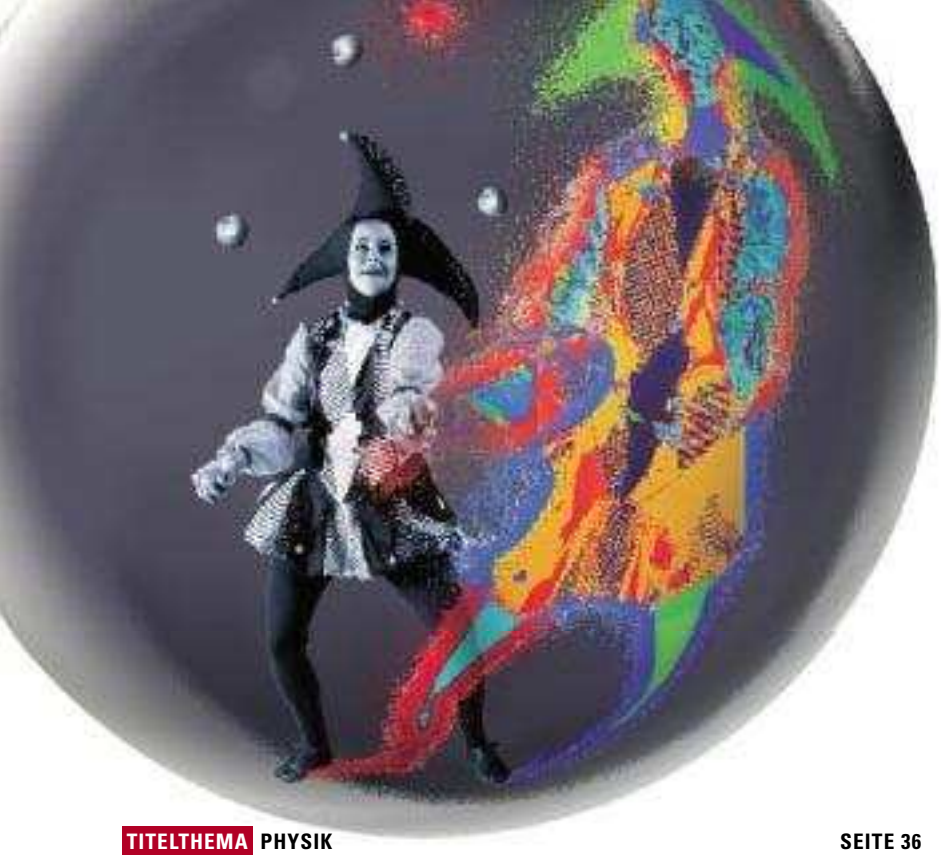
Technisch ist es machbar: Kohlendioxid aus Abgasen von Kraftwerken in tiefe Gesteinsschichten zu pressen, statt es in die Luft zu blasen. Aber können wir damit das Klimaproblem lösen?

SCHWERPUNKT IT-TRENDS

Hochleistungsrechnen SEITE 54
Wird im Jahr 2050 ein Computer denken wie ein Mensch? An der Rechenleistung scheitert es nicht

Übersetzer gesucht SEITE 60
Wie lassen sich wenige Nanometer große Schaltkreise in die Mikrowelt der Siliziumchips integrieren?

Morphware SEITE 66
Ein Chip, der sich neuen Aufgaben anpasst wie ein Chamäleon? Magnetologik macht es möglich



TITELTHEMA PHYSIK SEITE 36

Holografische Schwerkraft?

Kann das Universum eine Art Hologramm sein? Ein neues Weltmodell, das dies behauptet, enthält zugleich eine Quantentheorie der Schwerkraft. Ein solcher Zugang eröffnet einen neuen Blick auf die Theorie über Schwarze Löcher

SEITE 84

MEDIZINGESCHICHTE

Klostermedizin

Durch Ökowelle und Esoterik ist sie zu einem Modetrend geworden. Aber worum ging es bei der Medizin aus dem Kloster wirklich?

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 108

ESSAY

Vom Wert spekulativer Theorien in der Physik

Manche Theorien der theoretischen Physik haben sich so weit von der irdischen Realität entfernt, dass sie kaum jemals experimentell überprüft werden können. Der französische Theoretiker Carlo Rovelli sieht dennoch keine Alterative

MÄRZ 2006

KOMMENTARE

22 **Klonskandal in Südkorea**
Gehen Sie zurück auf Los

27 **Springers Einwürfe**
Physiker sind Kampfhähne

WISSENSCHAFT IM ...

52 **Alltag:** Risiko Tätowierung

107 **Rückblick:** Peilung mit der Zunge · Mehrfarbige Farben · Frische Luft für gerade Knochen u. a.

JUNGE WISSENSCHAFT

80 **Das Ufo von Wolfsburg**
Neu eröffnetes Science Center »phæno«

REZENSIONEN

92 **Geometrie und ihre Anwendungen**
von Georg Glaeser
Feynmans Regenbogen
von Leonard Mlodinow
Die Wissenschaft der Öffentlichkeit
von Peter Weingart
Das Rätsel Depression von Ulrich Hegerl, David Althaus und Holger Reiners
Ein Albatros namens Amelia
von Carl Safina
Null von Adam Fawer

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

100 **Sudoku oder die einsamen Zahlen**

WEITERE RUBRIKEN

5 **Editorial**
10 **Leserbriefe/Impressum**
104 **Preisrätsel**
114 **Vorschau**

DAS **ZUSATZANGEBOT SPEKTRUM-PLUS** FÜR ABONNENTEN FINDEN SIE AB DIESER AUSGABE AUF DER NÄCHSTEN SEITE ▶

TITELBILD

In der Grafik spiegeln sich zweidimensionale Gitter in Kugeln – Symbol für eine holografische Theorie der Gravitation

Grafik: Phil Saunders / Space Channel

Theologie ist die demütigere Wissenschaft

Streitgespräch, November 2005

Klare Abgrenzung fehlt

Die Antworten von Bischof Huber verharrten im Unbestimmten. Hätte er doch nur einmal beim Stichwort Fundamentalismus einen Satz fertig gebracht wie etwa: »Selbstverständlich ist für mich das ›Intelligent Design‹ keine Alternative zu Darwins Evolutionstheorie«, oder sogar die Aussage, dass Wundergeschichten einschließlich der im christlichen Glaubensbekenntnis enthaltenen heute nicht mehr wörtlich genommen werden können. Aber offenbar ist es auch heute noch von einem protestantischen Bischof ebenso wenig denkbar wie vom Papst, nämlich »über den Schatten seiner Schäfchen« zu springen.

Mit einer Aussage dieser Art hätte sich Bischof Huber aber deutlich von dem auch innerhalb seiner Kirche Sumpfblüten treibenden Fundamentalismus distanzieren können. Stattdessen ergibt sich nun eben einmal mehr das Bild einer mit dem Rücken zur Wand fechtenden Kirche.

Dr. Friedrich Werner, Altenholz

Differenzen weder verabsolutieren noch verharmlosen

Am wichtigsten meiner Meinung nach ist, dass beide Seiten, Wissenschaft und Religion, einander aufrichtig zuhören. Vielleicht bringt dies folgende Überlegung, die ich kürzlich in anderem Zusammenhang las, auf den Punkt: »Die Differenzen zwischen Eigen- und Fremdposition dürfen weder verabsolutiert noch verharmlost werden, sodass ein Gespräch zwischen beiden noch als möglich und zugleich stets als nötig erscheint, also weder ein Freund-Feind-Schema noch ein billiger Scheinfriede entsteht. Dies schließt den Respekt vor der eigenen und vor der fremden sowie die sachliche Kritik an der anderen und der eigenen Meinung ein.«

Christian Scholz, Sagard/Rügen

Es gibt etwas, weshalb ich denke

Wann begann der Mensch zu denken?
Dezember 2005

Einem Artikel in SdW 4/2002 zufolge ermöglichte erst der verlängerte Rachenraum des *Homo sapiens* ein differenziertes Sprechvermögen und somit modernes Denken. Dann zeigt sich, dass die Steuerung dieser Artikulation mit der feinmotorischen Manipulationsfähigkeit des Menschen zusammenhängt (01/2005). Schließlich werden als Artefakte dieser Manipulationsfähigkeit dann archäologische Fundstücke herangezogen, um den Beginn der Denkfähigkeit zu datieren.

Das Ganze enthält aber einen Umkehrschluss: Eine metaphysische Begrifflichkeit – das Denken – wird auf physische Erscheinungen – archäologische Funde – reduziert, um umgekehrt damit das Metaphysische »dingfest« zu machen. Dabei entsteht der Eindruck, man wüsste, was Denken und Verstand sind.

Aber am unteren Ende der Skala finden sich die physischen Anzeichen für Denken – Artikulation und Motorik – fallweise auch bei Tieren oder sogar Objekten. Konsequenz dieser Reduktion auf physische Anzeichen wäre dann: »Alles denkt, zumindest irgendwie!« Eine Wurzel des Verstands wäre demzufolge weitaus früher anzusetzen.

Zum oberen Ende der Skala dagegen finden sich weitere Fortschritte des menschlichen Denkens: Für Aristoteles war das beispielsweise das »zoon politikon« durch Acker- und Städtebau nach der letzten Eiszeit und für Karl Jaspers die »Philosophie der Achsenzeit« vor etwa 2600 Jahren – und vielleicht wird es mal das »vernetzte Denken« mittels Computer und Internet sein.

Konsequenz dieser Betrachtungen unterschiedlichen Denkvermögens wäre dann: »Immer wieder haben sich die Kriterien für menschliches Denken und Verstand geändert!« Die besondere Ausprägung des menschlichen Verstands wäre dann jedenfalls sehr viel später anzusetzen. »Cogito ergo sum!« heißt der existenzielle Urknall des Denkens: »Es gibt etwas, weshalb ich denke!« Deshalb ist der Verstand so schlecht »dingfest« zu machen.

Dr. Karsten Löhr, Ulm

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Heidelberg, HRB 8114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Corinna Gilley, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Claus-Peter Sesin, Prof. Klaus Volkert.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, D-70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005;
Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283;
Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410;
Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55;
Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49;
München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 27 vom 01. 01. 2006.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2006 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/ Managing Director, International: Dean Sanderson

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

▲ Aus Eiskristallen entstehen je nach Druck- und Temperaturbedingungen wunderschöne Gebilde wie Schneesterne.

Lautstark rieselt der Schnee

Wissenschaft im Alltag, Februar 2006

Wie entsteht Schnee?

Herr Gerl beschreibt die natürliche Entstehung des Schnees, indem sich kleinste Wassertröpfchen an Kristallisationskeimen anlagern sollen. Dies würde zu den Gebilden führen, die man Graupeln nennt.

Schneekristalle entstehen in einem weiten Temperaturbereich unter 0° C und sehr variablen Wasserdampfdrucken aus der Gasphase. Es lagern sich also an einem Kristallisationskeim dampfförmige H_2O-Moleküle an und bilden einen Eiskristall mit sechszähliger Symmetrie. Je nach den Druck- und Temperaturbedingungen werden daraus Plättchen, Säulen oder die weithin bekannten Schneesterne. Je nach den Bedingungen wachsen sie schnell und bilden die unregelmäßigen Kristalle, die dann individuell einzig sind. Beim Herabsinken und höheren Temperaturen – aber noch unter 0° C – verkleben sie zu den bekannten Schneeflocken. Dabei verändern sich die Kristalle fortwährend immer im Gleichgewicht mit der Umgebung.

Joachim A. Lorenz, Karlstein

Energieverbrauch deutlich niedriger

Wenn der von Herrn Gerl in diesem Beitrag unterstellte Energieverbrauch von 8 bis 10 Megawattstunden für die Beschneiung von einem Hektar Piste in 12 Stunden zutreffen würde, wäre die Stromversorgung in den künstlich beschneiten Regionen schon lange zusammengebrochen.

Ein durchschnittlicher 4-Personen-Haushalt hat einen jährlichen Stromverbrauch von 4 Megawattstunden im Jahr.

Dr. Harald Gegenfurtner, München

Von Lockerschnee- zu Staublawinen

Lawinenschutz aus dem All? Januar 2006

Die Bildlegenden sind meiner Meinung nach nicht ganz korrekt. Bei dem Bild auf S. 85 handelt es sich weniger um eine Lockerschneelawine als vielmehr um eine Staublawine. Auch die Abbildung auf S. 86 zeigt eine Staublawine, die sicherlich aus einer Schneebrettlawine entstanden ist, im auf dem Bild erkennbaren Zustand jedoch eine Staublawine darstellt.

Lockerschneelawinen werden sowohl von ihrer Konsistenz als auch ihrer Auslösemechanik eher selten zu Staublawinen. Sie bilden sich stets aus lockerem (nassem) Schnee an der Oberfläche. Im Verlauf des Abgangs kann durchaus und besonders bei Nassschnee ein extrem kompakter Lawinenkegel entstehen, der aber mit dem Bild auf S. 85 wenig gemein hat. Diese Lockerschneelawinen können unter bestimmten Bedingungen Schneebrettlawinen auslösen, die dann zu Staublawinen werden können.

Eine Staublawine braucht zur Bildung eine relativ große Masse an trockenem Schnee und einen relativ steilen Hang (> 40 Grad). Man erkennt sie auch am eher »stiebenden« statt fließendem Verlauf.

Klaas Ebel, Jülich

Errata

150 Jahre Trockenheit, Januar 2006

In der Grafik über die Messungen der Titankonzentration auf S. 45 steht fälschlicherweise v. Chr., es handelt sich aber um Zahlenangaben n. Chr. Ausnahmsweise muss die Zeitskala hier von rechts nach links gelesen werden.

Exodus im Computer, Januar 2006

Auf S. 60 wurden leider die Bilder vertauscht.

Die Redaktion

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com

Der Mörder und sein Opfer: Ein Adler hockt auf dieser Fotomontage dräuend hinter dem Schädel des Taung-Kinds.

KENNETH GARRETT / NATIONAL GEOGRAPHIC, MIT FRDL. GEN. VON SHIRONA HASSIM, UNIVERSITÄT WITWATERSRAND, JOHANNESBURG

PALÄANTHROPOLOGIE

Adler tötete Kind von Taung

Ein besonderer Kriminalfall der Wissenschaftsgeschichte scheint gelöst: Neue Indizien haben den Mörder des berühmten »Kindes von Taung« überführt. Das Opfer lebte vor etwa 2,5 Millionen Jahren in Südafrika und starb im Alter von 3,5 bis 4 Jahren. Erhalten ist nur sein 1924 gefundener Schädel. Er erregte damals großes Aufsehen als fehlendes Bindeglied zwischen Affe und Mensch und erhielt von seinem Entdecker den Artnamen *Australopithecus africanus*.

Bislang herrschte in der Fachwelt die Ansicht, das Taung-Kind sei einem Säbelzahntiger oder Leoparden zum Opfer gefallen. Schon vor zehn Jahren hatte Lee Berger von der Universität Witwatersrand in Johannesburg dagegen einen Adler ins Spiel gebracht, ohne sich freilich durchsetzen zu können. Eine neuere Veröffentlichung von Forschern um Scott McGraw von der Universität von Ohio, die an Affenschädeln Spuren von Greifvögeln nachwiesen, brachte den Wissenschaftler nun dazu, den Kopf des Kleinkinds erneut zu untersuchen. Dabei entdeckte er dieselben verräterischen Zeichen: zusammengepresste Knochen in der Schädeldecke und schlüssellochförmige Einschnitte von Krallen an den Seiten.

Pressemitteilung der Universität Witwatersrand, 12.1. 2006

ARCHÄOLOGIE

Älteste Maya-Inschrift

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

In den erst 2001 entdeckten Mayaruinen von San Bartolo im Dschungel Guatemalas fand ein Forscherteam um William Saturno von der Universität von New Hampshire in Durham jetzt in einer unterirdischen Kammer einen Mauerrest mit zehn Schriftzeichen. Aufgetragen wurden sie, wie die Radiokarbondatierung umliegender verkohlter Holzstücke ergab, vor rund 2300 Jahren. Damit sind sie etwa 200 Jahre früher entstanden als die ältesten bisher bekannten Maya-Inschriften.

Die zehn Zeichen stehen senkrecht übereinander und wurden mit dicken schwarzen Strichen auf weißen Putz aufgetragen. Sie laufen über einen breiten, blassrosa Streifen, an dem sich der Schreiber wahrscheinlich orientierte. Die Forscher vermuten, dass die Zeichen das Ende eines längeren Textes sind. Nur eines davon konnten sie bisher entziffern: eine frühe Version des Symbols für das Wort »ajaw« *(a)*, das in der Sprache der Maya »Herr« oder »Führer« bedeutet. Einige Zeichen wirken noch stark bildhaft – so zeigt eines offenbar eine Hand, die eine Bürste hält *(b)*.

Der Fund belegt, dass die Mayaschrift deutlich älter ist als bisher gedacht. Demnach dürfte sie auch nicht, wie viele meinen, von benachbarten Völkern übernommen worden sein, die in der vorklassischen Mayaperiode schon über hoch entwickelte Schriftsysteme verfügten.

Science, Online-Vorabveröffentlichung, 5.1. 2006

Auf diesem Gesteinsbrocken aus den Ruinen von San Bartolo steht die älteste bisher bekannte Maya-Inschrift.

EVOLUTION

Tanz offenbart gute Gene

Gute Tänzer sind auch körperlich attraktiver, weil symmetrischer gebaut. Dies hat ein Team um William Brown von der Rutgers-Universität in New Jersey herausgefunden. Die Forscher untersuchten 183 tanzende Teenager aus Jamaika. Mit Infrarot-Reflektoren an 41 Stellen des Körpers übertrugen sie die Bewegungsabläufe der 14- bis 19-Jährigen auf einen Computer, der daraus einen kleinen Film mit einer computeranimierten, geschlechtslosen Gliederpuppe kreierte. So wurde der Einfluss von Faktoren wie Kleidung oder äußerliche Schönheit ausgeschaltet. Anschließend mussten andere jamaikanische Jugendliche die Bewegungen der Figuren bewerten. Das erstaunliche Ergebnis: Die synthetischen Tänzer erhielten umso bessere Noten, je symmetrischer das Original war.

Ebenmäßigkeit hat sich in vielen Untersuchungen als Hauptfaktor für körperliche Attraktivität erwiesen – vermutlich weil sie von einer makellosen genetischen Ausstattung zeugt. Wer tanzt, offenbart also das Ausmaß seiner Körpersymmetrie. Wie das geschieht, weiß Brown allerdings nicht. Vielleicht erlaube eine hohe Symmetrie eine bessere Koordination oder mache selbstbewusst und beseitige so Hemmungen, meint er.

Obwohl die Computerfiguren geschlechtslos waren, erhielten die Herren von den Damen im Schnitt bessere Zensuren als umgekehrt. Die Forscher erklären das damit, dass Frauen bei der Selektion ihrer Partner stärker auf gute Gene achten als Männer, weil sie bedeutend mehr in den Nachwuchs investieren.

Nature, 29.12. 2005, S. 1148

PALÄONTOLOGIE

Eier legende Spitzmaus

Es sah aus wie eine Spitzmaus, watschelte wie ein Schnabeltier und legte wahrscheinlich Eier. Dem Dunkel der Urzeit entrissen wurde dieses seltsame Wesen nun durch ein 125 Millionen Jahre altes Fossil, das eine Forschergruppe um Zhe-Xi Luo vom Carnegie-Museum in Pittsburgh (Pennsylvania) in Seesedimenten im Nordosten Chinas entdeckte. Mit seiner kuriosen Mixtur von Eigenschaften liefert *Akidolestes cifellii* – so sein offizieller Name – einen interessanten Schnappschuss aus der frühen Evolution der Säuger.

Wirbelsäule, Becken und Hinterbeine der Neuentdeckung erinnern an die der Kloakentiere. Diese Ursäuger, von denen heute nur noch das Schnabeltier und der Ameisenigel existieren, legen wie Vögel oder Reptilien Eier. In seiner Vorderhälfte glich *A. cifellii* dagegen den höher entwickelten Beutel- und Plazentatieren, die ihre Nachkommen lebend gebären. Nach Kiefer und Zähnen zu urteilen, verzehrte es wie eine Spitzmaus Insekten und bewegte seine Vorderläufe dabei ähnlich wie ein Eichhörnchen. Offenbar bildete es also eine bislang unbekannte Übergangsform zwischen den Kloakentieren und den höheren Vertretern der Säugerklasse.

Nature, 12.1. 2005, S. 195

ZHE-XI LUO, CARNEGIE MUSEUM OF NATURAL HISTORY, PITTSBURGH

Das neu entdeckte Fossil von *Akidolestes cifellii* – unten eine Rekonstruktion – weist Merkmale von modernen und primitiven Säugern auf.

BRIAN CHAN, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT) CAMBRIDGE

Auch wenn »RoboSnail« äußerlich kaum an eine Schnecke erinnert, kann er wie sein Vorbild sogar an der Decke entlangkriechen.

TECHNIK

Künstliche Schnecke

Schnecken haben jetzt ein mechanisches Gegenstück. Entwickelt wurde das Gerät namens »RoboSnail« von Anette Hosoi und Kollegen am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge. Wie sein Vorbild kann es senkrechte Wände erklimmen und sich kopfüber die Decke entlangbewegen.

Landschnecken kriechen mit Hilfe einer Kontraktionswelle in ihrem Fuß. Diese wandert von hinten nach vorne und drückt das Tier dabei vorwärts. Eine Schleimschicht unter der Fußsohle ermöglicht das Gleiten und lässt die Schnecke am Untergrund haften.

Um diese Fortbewegungsweise so gut wie möglich zu simulieren, statteten die Wissenschaftler ihr Konstrukt mit sechs flachen Füßen aus. Diese sind in einer Reihe an schmalen Stäben angeordnet und rücken zunächst einer nach dem anderen ein kleines Stück vor; dann zieht der »Körper« nach. Wie eine natürliche Schnecke gleitet auch »RoboSnail« über eine Schleimschicht. Sie besteht aus dem Kunststoff Laponit und ist klebrig genug, dass die nur 32 Gramm schweren Automaten nicht von der Decke fallen.

Die Forscher wollen mit ihrer Schöpfung mathematische Modelle für die Schneckenbewegung testen, denken aber auch an praktische Anwendungen. Schließlich kommt »RoboSnail« wie sein natürliches Vorbild praktisch mit jedem Untergrund zurecht.

Physics of Fluids, Bd. 17, S. 113101

Mitarbeit: Sonja Huhndorf und Stephanie Hügler

Kosmischer Kreißsaal

Rund eine Milliarde Pixel umfasst die bisher detaillierteste Aufnahme des Orionnebels, für die das Hubble-Weltraumteleskop kürzlich 105 Erdumläufe lang sämtliche Instrumente auf das eindrucksvolle, 1500 Lichtjahre entfernte Himmelsobjekt gerichtet hat. Das Bild erweckt den Eindruck einer dramatischen Staub-und-Gas-Landschaft aus Plateaus, Bergen und Tälern. Mehr als 3000 Sterne lassen sich erkennen – darunter solche, die nur ein Hunderstel so hell leuchten wie die gerade noch sichtbaren Objekte in früheren Aufnahmen. Zum ersten Mal sind auch Braune Zwerge zu sehen.

Massereiche Sterne im Zentrum haben mit ihrer Strahlung einen Großteil des Gases in ihrer Umgebung weggeblasen und so einen gigantischen Hohlraum im Nebel geschaffen, den sie von innen ausleuchten. Seine Ränder erscheinen als Schluchten mit tiefen Einbuchtungen und Überhängen. Vereinzelt ragen Nebelschwaden wie Säulen in den Abgrund. Darin verbergen sich Sterne im Werden, noch eingesponnen in ihre Staubkokons. Dicht geballt enthält der kosmische »Grand Canyon«, wie die Nasa die Struktur emphatisch bezeichnet, junge stellare Objekte jeder Größe und Entwicklungsstufe. Deren vergleichende Untersuchung soll den Astronomen jetzt erlauben, Geburt und Kindheit der Sterne in Abhängigkeit von der Masse genauer denn je nachzuvollziehen.

NASA / ESA / MASSIMO ROBBERTO (STSCI) AND HST ORION TREASURY PROJECT TEAM

MEDIZIN

Mit Mini-Torpedos gegen Viren und Krebs

Kleine RNA-Schnipsel können gezielt Gene stumm schalten. Nun gibt es erste Ansätze, die winzigen Saboteure auch für therapeutische Zwecke zu nutzen.

Von Petra Jacoby

Auf den ersten Blick erscheinen Virusinfektionen und Krebs als völlig unterschiedliche Krankheiten. Auf molekularer Ebene haben sie jedoch eine grundlegende Gemeinsamkeit: In beiden Fällen werden in den kranken Zellen »falsche« Gene abgelesen.

Ein Virus geht bei seiner Vermehrung wie ein Pirat vor. Es entert eine Zelle, übernimmt deren Enzymapparat und zwingt sie, statt ihrer eigenen Erbinformation diejenige des Eindringlings abzulesen und die zugehörigen Proteine herzustellen. In Krebszellen wiederum sind zelleigene Gene aktiv, die eigentlich stumm bleiben sollten – etwa solche, welche die Zellteilung anregen. Auf diese Weise kann aus einer einzigen unkontrolliert wachsenden Zelle ein Tumor hervorgehen.

Ein Arzneimittel, mit dem sich gezielt Gene zum Schweigen bringen ließen, wäre folglich eine wahre Wunderwaffe für die Medizin. Als viel versprechende Kandidaten dafür haben sich nun so genannte siRNAs (*small interfering* RNAs) erwiesen: kurze doppelsträngige RNA-Moleküle aus nur 22 Nucleotidbausteinen. Sie können Gene lahm legen, indem sie deren Boten-RNAs – Arbeitskopien, die als Vorlage für den Zusammenbau des jeweiligen Proteins dienen – im Zellplasma abfangen und zerstören (Spektrum der Wissenschaft 10/2003, S. 52).

Mit dieser Methode wehren sich zum Beispiel Pflanzen gegen bestimmte Viren, deren Genom aus doppelsträngigen RNA-Molekülen besteht. Mit einer molekularen Häckselmaschine zerschnippeln sie die langen Erbfäden einfach in Stücke passender Länge, die dann als siRNAs die viralen Gene ausschalten. Genauso gut lassen sich die kleinen Genblocker aber auch künstlich im Reagenzglas synthetisieren, indem man ihre Nucleotidbausteine der Reihe nach aneinander fügt.

Stummschalter für Gene

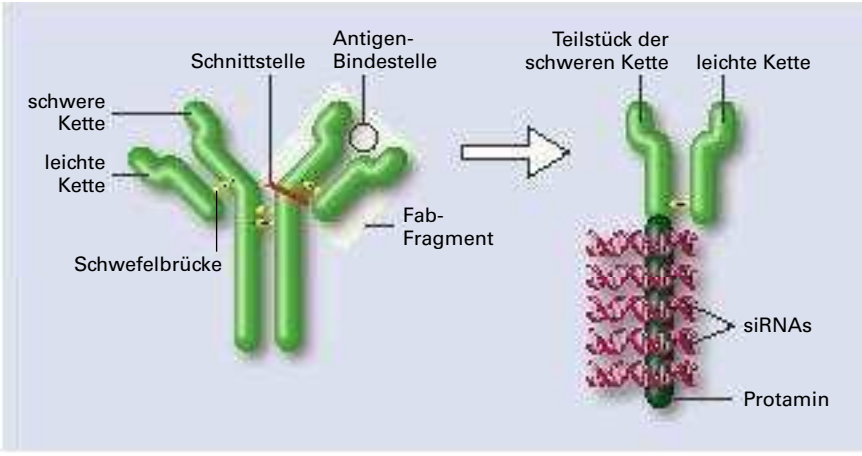
Wissenschaftler verwenden siRNAs schon seit mehreren Jahren, um in Zellkulturen gezielt Gene stumm zu schalten und anhand der resultierenden Ausfallerscheinungen die Funktion dieser Erbfaktoren zu ermitteln. Dazu stellen sie kurze doppelsträngige RNA-Stücke her, deren Nucleotide – die »Buchstaben« des genetischen Alphabets – in derselben Reihenfolge angeordnet sind wie in einem kleinen Ausschnitt des Gens, das abgeschaltet werden soll. Diese Schnipsel schleusen sie mit Hilfe von Chemikalien oder hohem Druck durch die Membran in die Zellen ein.

Dort übernimmt dann die so genannte RNA-Interferenzmaschinerie die weitere Arbeit: Sie zerlegt jede siRNA wie einen Reißverschluss in ihre beiden Einzelstränge und spannt jeweils einen davon derart in einen Enzymkomplex namens RISC ein, dass die »Zähne« – das heißt die ungepaarten siRNA-Basen – herausragen. Aus den vielen tausend verschiedenen Boten-RNA-Sorten im Zellplasma fischt jeder solche Komplex nur diejenigen heraus, deren Basensequenz einen Abschnitt enhält, der seinem eigenen entspricht (genauer: komplementär zu ihm ist).

Eine RISC-Komponente namens Slicer schneidet die eingefangenen Boten-RNAs schließlich in der Mitte durch und macht sie auf diese Weise unbrauchbar für die Eiweißsynthese. Damit wird das Ziel-Gen zwar noch abgelesen, das von ihm codierte Protein aber nicht mehr hergestellt.

Man kann siRNAs mit jeder gewünschten Nucleotidabfolge erzeugen und somit praktisch jedes beliebige Gen in einer Zelle außer Betrieb setzen. Aus diesem Grund wären die kleinen Störmoleküle exzellente Waffen gegen Virusinfektionen oder Krebs, bei denen schädliche Gene ruhig gestellt werden müssen. Wie aber lassen sich solche therapeutischen siRNAs im lebenden Organismus gezielt in die erkrankten Zellen einschleusen? Die rabiaten und unspezifischen Methoden, die man bei Zellkulturen benutzt, sind beim lebenden Objekt ungeeignet. Deshalb suchen Forscher weltweit nach anderen, medizinisch verträglichen Methoden.

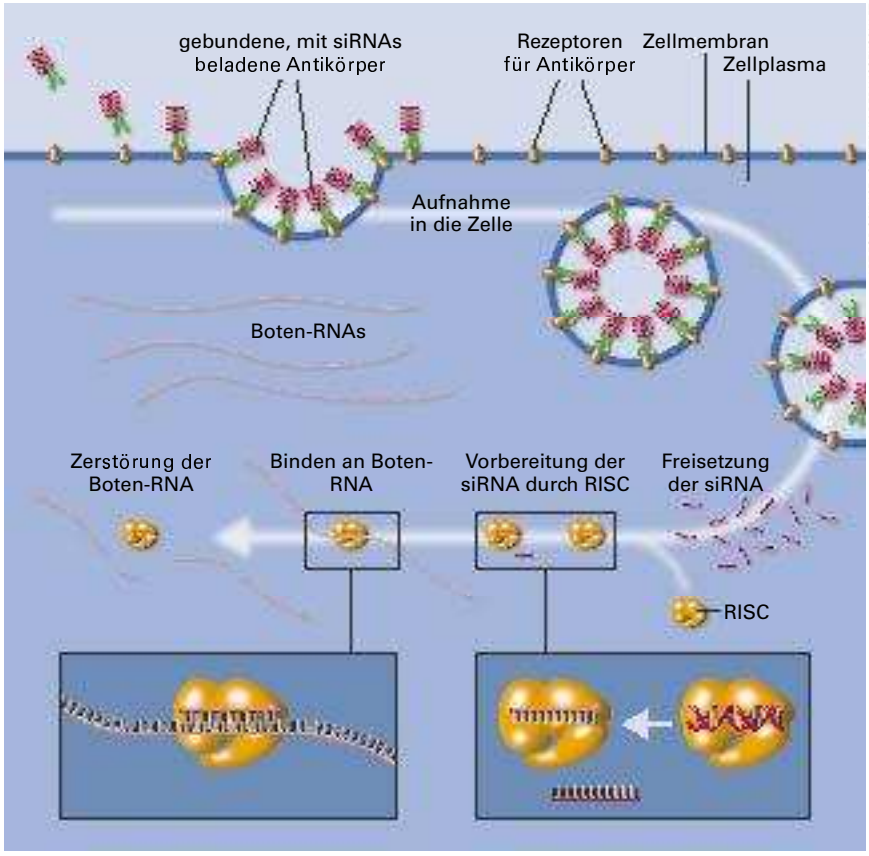
Judy Lieberman und ihre Kollegen von der Harvard-Universität in Boston (Massachusetts) und der Universität von Pennsylvania in Philadelphia hoffen das Problem jetzt mit gentechnisch hergestellten Antikörpern lösen zu können, die als Transportvehikel für die siRNAs dienen sollen *(Nature Biotechnology, Bd.*



ART FOR SCIENCE / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

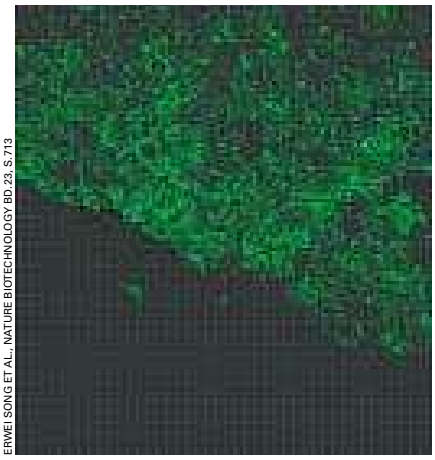
Aus dem Bruchstück eines Antikörpers (links), einem so genannten Fab-Fragment, erzeugten US-Forscher ein maßgeschneidertes Taxi für siRNA-Moleküle, die sie mit dem Eiweiß Protamin daran befestigten (rechts).

Das Antikörperkonstrukt gelangt nach dem Andocken an ein Erkennungsmolekül auf seiner Zielzelle in einem Membranbläschen ins Innere. Dort werden die angehängten siRNA-Moleküle, die nur aus 22 Nucleotiden bestehen, freigesetzt und in die beiden Einzelstränge aufgespalten. Ein Enzymkomplex namens RISC nimmt einen davon auf und benutzt ihn als Vorlage, um Boten-RNAs aus dem Zellplasma zu fischen, die einen Abschnitt mit komplementärer Nucleotidsequenz enthalten. Diese werden dann zerschnitten und somit zerstört.

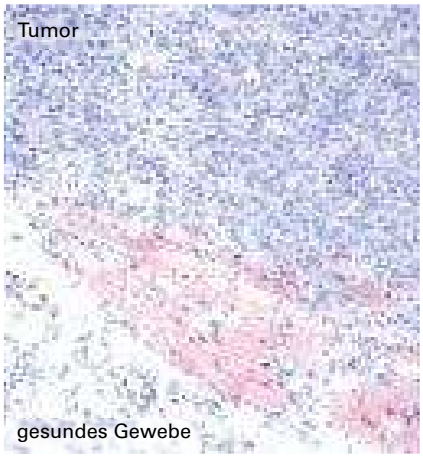


ART FOR SCIENCE / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

23, S. 709). Diese sind so konstruiert, dass sie sich spezifisch an ein Protein anlagern, das ausschließlich auf der Oberfläche der Zielzellen vorkommt. Zugleich fungiert ein Anhängsel aus dem positiv geladenen Eiweißstoff Protamin als Kupplung für die RNA-Winzlinge; denn negativ geladene Nucleinsäuremoleküle wie DNA oder RNA kleben daran fest. ▷



ERWEI SONG ET AL., NATURE BIOTECHNOLOGY BD. 23, S. 713



Der lichtmikroskopischen Aufnahme eines Schnitts durch den Hauttumor einer Maus (rechts) ist ein Fluoreszenzbild (links) gegenübergestellt. Der Vergleich macht deutlich, dass die gentechnisch hergestellten Antikörper ihre Ladung aus siRNAs (grün) gezielt nur in die dicht gepackten Tumorzellen einschleusen, nicht jedoch in das angrenzende gesunde Gewebe.

Solch ein aufgerüsteter Antikörper kann seine siRNA-Ladung zielsicher durch Blut und Gewebeflüssigkeit zu den kranken Zellen lotsen. Dort angekommen, heftet er sich an das entsprechende Oberflächenprotein. Daraufhin nimmt die Zelle den Torpedo samt seiner Fracht auf, indem sie ihn in einem Membranbläschen nach innen abschnürt. Durch das dort herrschende saure Milieu trennen sich die siRNAs vom Protamin und gelangen schließlich ins Zellplasma, wo sie ihre Mission erfüllen können.

Zunächst prüften Lieberman und ihre Kollegen, ob diese Strategie bei virusinfizierten Zellen funktioniert. Dazu fabrizierten sie einen mit Protamin verknüpften Antikörper, der das Hüllprotein gp120 des Human-Immunschwächevirus HIV erkennt. Sowohl an der Außenseite des Aidserregers als auch auf den Membranen infizierter Zellen sitzen Unzählige dieser gp120-Moleküle und können als Andockstellen für siRNA-Fähren dienen.

Um schädliche Nebenwirkungen zu vermeiden, reduzierten die Wissenschaftler den künstlichen Antikörper auf das kleinste noch funktionstüchtige Teilstück. Dieses so genannte Fab-Fragment besteht aus zwei Proteinketten, die über ein Scharnier aus zwei Schwefelatomen an einem Ende zusammengehalten werden und so eine Art Greifzange bilden, mit der sich der Antikörper an sein Zielobjekt klemmt. Die Forscher koppelten die Erbsubstanz für eine der beiden Ketten an das Gen für Protamin und schleusten die künstliche Zwitter-DNA zusammen mit der Bauanweisung für die zweite Kette in Kulturzellen ein. Diese stellten daraufhin große Mengen des Mini-Antikörpers mit dem Protaminkleber her.

Anschließend bestückten Lieberman und ihre Kollegen die derart erzeugten Transportvehikel mit siRNAs gegen das gag-Gen von HIV. In diesem ist das Protein verschlüsselt, das die Innenkapsel des Virus aufbaut. Wird es nicht in ausreichender Menge gebildet, können keine neuen infektiösen Erreger entstehen. Die Rechnung der Forscher ging auf: Die mit siRNAs bewaffneten Antikörper schafften es, die Virusvermehrung in HIV-infizierten T-Lymphozyten – einer bestimmten Art weißer Blutkörperchen – um über siebzig Prozent zu senken.

Erfolge bei Krebszellen

Als Nächstes testeten die Wissenschaftler ihre Methode an Tumorzellen. Um nicht eigens einen neuen Antikörper fabrizieren zu müssen, wendeten sie einen Trick an: Sie schleusten einfach in Hautkrebszellen das HIV-Gen ein, auf dem die Erbinformation für gp120 steht. Diese stellten daraufhin die Erkennungsmoleküle für die siRNA-Fähre her und trugen sie auf ihren Oberflächen.

Die Forscher spritzten die so manipulierten Krebszellen dann Mäusen unter die Haut. Einem Teil der Tiere injizierten sie anschließend einen Cocktail aus Antikörpern, die mit unterschiedlichen siRNAs gegen drei verschiedene krebsfördernde Gene beladen waren. Das Ergebnis bestätigte die hochgespannten Erwartungen: Bei den behandelten Mäusen waren die Geschwulste, die sich aus den wuchernden Krebszellen bildeten, nach neun Tagen nicht einmal halb so groß wie bei Tieren, die keine siRNA-Antikörper erhalten hatten.

Nach diesem ersten Erfolg machten sich Lieberman und ihre Kollegen die Mühe, auch noch einen speziellen Mini-Antikörper zu produzieren, der gezielt Brustkrebszellen ansteuert. Schließlich ist der Trick mit dem künstlich eingeschleusten HIV-Gen im medizinischen Ernstfall nicht anwendbar. Als Andockstelle wählten die Forscher das Protein ErbB2, das viele Brustkrebszellen wie ein Erkennungsschild auf ihrer Oberfläche tragen. Sie erzeugten einen dagegen gerichteten Antikörper mit Protaminkleber und beluden ihn mit siRNA-Molekülen gegen ein Kontrollgen namens Ku70.

Tatsächlich gelang es so, dieses Gen in Brustkrebszellen stumm zu schalten. Zwar ist Ku70 nicht krebsfördernd, weshalb in dem Experiment das Wuchern des Tumors nicht gebremst wurde. Doch nachdem die prinzipielle Machbarkeit bewiesen ist, sollte sich mit anderen siRNA-Molekülen auch eine therapeutische Wirkung erzielen lassen.

Angesichts dieser Erfolge bestehen gute Chancen, dass sich für die kleinen Genzensoren endlich der Weg in die medizinische Anwendung öffnet. Die Möglichkeiten scheinen fast unbegrenzt; denn nach dem Baukastenprinzip lassen sich siRNA-Medikamente exakt nach Bedarf anfertigen: Der Antikörperteil kann perfekt auf den jeweiligen Zielzelltyp zugeschnitten werden, und die siRNA-Ladung richtet sich nach den Genen, die man zum Schweigen bringen will. Wenn das Verfahren auch beim Menschen funktioniert, hätte die Medizin auf einen Schlag gleich ein ganzes Arsenal von Arzneimitteln zur Hand. Damit ließen sich nicht nur Viren und Krebs bekämpfen, sondern auch andere Leiden, bei denen unerwünschte Gene aktiv sind – etwa Autoimmunerkrankungen oder schwere Entzündungen.

Petra Jacoby ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Wittlich.

KOMMENTAR

Gehen Sie zurück auf Los

Nach dem Aufdecken spektakulärer Fälschungen steht das therapeutische Klonen wieder bei null – konstatiert Michael Groß.

Das Jahr 2005 endete für das noch junge, aber hoffnungsvolle Gebiet der Stammzellforschung mit einem Eklat. Einer der Stars der Szene, der Koreaner Woo Suk Hwang, wurde des Betrugs überführt: Zwei seiner jüngsten, als bahnbrechend gefeierten Veröffentlichungen, über die auch in dieser Zeitschrift berichtet worden war *(Spektrum der Wissenschaft 4/2004, S. 14, und 7/2005, S. 22)*, erwiesen sich als gefälscht. Nur die dritte Publikation über das Klonen eines Hundes hielt der Echtheitsprüfung stand.

Eine eigens eingesetzte Untersuchungskommission widerlegte bereits im Dezember die angebliche Gewinnung von elf patientenspezifischen Stammzellkulturen aus geklonten Embryonen, die Hwang im vergangenen Jahr beschrieben hatte. Statt elf lagen nur zwei verschiedene Zelllinien vor, und diese waren aus überzähligen Embryonen einer Reagenzglasbefruchtung hervorgegangen, nicht aus Klonen.

Im Januar demontierten die Prüfer zusätzlich Hwangs Veröffentlichung von 2004, in der er das Klonen eines menschlichen Embryos und dessen Kultivierung bis zum Blastozystenstadium beschrieben hatte. Dabei stammten die entkernte Eizelle und der eingesetzte fremde Zellkern von derselben Spenderin. Das ließ die Möglichkeit einer Parthenogenese offen: einer Embryonalentwicklung, die von der unbefruchteten Eizelle und deren eigenem Chromosomensatz ausgeht. Tatsächlich war der vermeintliche »Klon« auf diese Weise entstanden. Abbildungen, die das Gegenteil beweisen sollten, waren schlicht gefälscht.

Der nun aufgedeckte Betrugsfall hat den Hoffnungen, aus geklonten menschlichen Embryonen patientenspezifische Stammzellen herstellen und daraus körperidentisches Ersatzgewebe für Eigentransplantationen züchten zu können, einen schweren Dämpfer verpasst. Die Uhr für dieses therapeutische Klonen wurde nun gleichsam um zwei Jahre zurückgestellt. Es gilt zwar als sicher, dass man menschliche Embryonen klonen kann, doch die Etablierung von Stammzelllinien aus solchen Embryonen bleibt ein bislang unerreichtes Ziel.

Nach dem Ausscheiden der Südkoreaner übernehmen britische Labors jetzt die Führung auf diesem Gebiet. Alison Murdoch an der Universität Newcastle ist zusammen mit dem vor den deutschen Gesetzen geflohenen Miodrag Stojkovic dem Ziel des therapeutischen Klonens am nächsten gekommen. Doch beide zeigen wenig Begeisterung über ihre neu erworbene Spitzenreiterrolle. Wenn Hwang an den patientenspezifischen Stammzellen scheiterte, obwohl ihm das von vielen als schwieriger eingestufte Klonen eines Hundes gelang, dürfte so bald niemand den Durchbruch schaffen. Und die Öffentlichkeit, die vielerorts ohnehin ein gespaltenes Verhältnis zu diesem Forschungsgebiet hat, wird neue Sensationsmeldungen mit doppeltem Mißtrauen beäugen.

Von der Krise nicht direkt betroffen sind hingegen die Forscher der Universität Oxford, die immunologisch verträgliche Stammzellpräparate einheitlich für viele Patienten erzeugen wollen, wobei der umstrittene Klonierschritt entfiele. Obwohl dieser Ansatz bisher viel weniger Aufmerksamkeit fand, hat er jetzt mehr denn je die besten Chancen, innerhalb der nächsten zehn Jahre die klinische Anwendung zu erreichen. Viele andere in der Klon- und Stammzellforschung tätige Wissenschaftler werden angesichts der geänderten Lage ihre Ziele überdenken und womöglich ihre Förderanträge umschreiben müssen.

Verschärftes Nachdenken ist auch bei der Redaktion von »Science« angesagt. Das renommierte Fachblatt war schon von den Fälschungen des Nanotechnologie-Forschers Jan-Hendrik Schön schwer betroffen und erlebt somit gerade seinen zweiten GAU innerhalb eines halben Jahrzehnts. Zwar ergaben erste Nachprüfungen keinerlei Hinweise auf Unregelmäßigkeiten bei der Annahme der Publikationen. Dennoch hat der Chefredakteur von »Science«, Donald Kennedy, bereits angekündigt, dass eine Untersuchungskommission den Weg der Hwang-Manuskripte von der Einsendung bis zum Abdruck genauestens rekonstruieren soll, um für die Zukunft zu klären, ob und wo sich die Kontrollmechanismen verbessern lassen.

Zum Beispiel könnte man eingesandte Abbildungen routinemäßig auf Duplikation oder elektronische Manipulation überprüfen, um auszuschließen, dass nicht existente Forschungsergebnisse mit Computerhilfe herbeigezaubert wurden. Ein Check der Daten auf Wiederholungen hätte auch die 908 Patienten eines norwegischen Forschers, der letzten Oktober eine Studie in der angesehenen Fachzeitschrift »Lancet« veröffentlichte, als frei erfunden aufgedeckt, weil 250 von ihnen denselben Geburtstag hatten.

Bisher wird im Rahmen des üblichen Peer-Review, also der Begutachtung unter Fachkollegen, zwar ausgiebig, aber nicht bis ins letzte Detail kontrolliert. Gerade bei Pioniertaten an den Grenzen des Möglichen liegt es in der Natur der Sache, dass die Gutachter ein neues Forschungsergebnis nicht eben schnell reproduzieren können. Eine geschickte Manipulation lässt sich da nicht immer aufspüren. Und vermutlich gibt es auch einen Vertrauensbonus gegenüber geschätzten Kollegen. Ohnehin ist das Peer-Review, wie der Chefredakteur von »Lancet« meint, primär darauf ausgerichtet, handwerklich schlechte Arbeiten zu erkennen und nicht Fälschungen.

Trotzdem kann ein Täuscher nicht hoffen, dass in einem Gebiet, das so viel öffentliches Interesse auf sich zieht wie die Klon- und Stammzellforschung, ein größerer Betrug auf Dauer unentdeckt bleibt. Im Fall Hwang haben ethisch anfechtbare Methoden zur Beschaffung von Eizellen die Aufklärung beschleunigt. Aber auch ohne diesen wunden Punkt hätte der »oberste Forscher« Südkoreas, wie sein offizieller Ehrentitel noch bis vor Kurzem lautete, kaum eine Chance gehabt, ungestraft davonzukommen. Insofern bleibt es bei ihm wie im Fall Schön ein Rätsel, wie ein extrem intelligenter Mensch so unglaublich dumm sein konnte.

Michael Groß

www.proseandpassion.com

QUANTENGRAVITATION

Im Raum der Möglichkeiten

Wie viele Dimensionen hat die Welt, und warum? Jüngste Forschungen lieferten neue mögliche Antworten auf diese Frage.

Von Markus Pössel

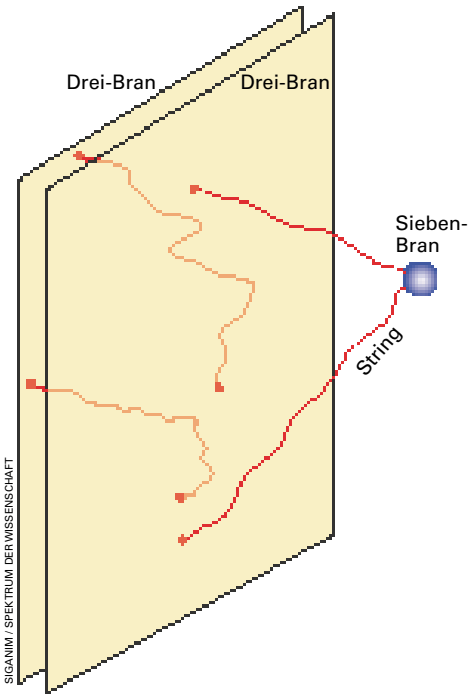
Dass der Raum drei Dimensionen hat, glauben wir aus eigener Erfahrung zu wissen. Aber das ist vielleicht nicht einmal die halbe Wahrheit. Tatsächlich könnte das Universum neun oder gar zehn Raumdimensionen aufweisen. Das behauptet schon seit Längerem die Stringtheorie – einer der am weitesten gediehenen Ansätze, Einsteins Gravitationstheorie und die Quantenmechanik miteinander zu verbinden. Als Fortentwicklung der herkömmlichen Elementarteilchenphysik ersetzt sie deren punktartige Partikel durch eindimensionale Fäden: die Strings. Aber wenn es so viele Dimensionen gibt, warum nehmen wir nur drei davon wahr?

Eine interessante mögliche Antwort haben nun Andreas Karch von der Universität von Washington in Seattle und Lisa Randall von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) vorgestellt. Dabei gehen sie von einer modernen Version der Stringtheorie aus, in der neben den Fäden weitere fundamentale Objekte verschiedener Dimensionalität vorkommen. Diese wurden in Anlehnung an das Wort Membran »Branen« getauft. Während eine Null-Bran ein Punkt ist, ähneln Eins-Branen einem Faden und Zwei-Branen der namensgebenden Membran; eine Drei-Bran schließlich füllt genau wie unser Alltagsraum ein dreidimensionales Volumen aus.

Mit diesen Objekten entwarfen Karch und Randall ein kosmologisches Szenario für das junge Weltall. In herkömmlichen Urknallmodellen bevölkern freie Elementarteilchen den frühen, extrem heißen Kosmos. Trifft eines davon auf ein entsprechendes Antiteilchen, vernichten sich beide und erzeugen dabei hochenergetische elektromagnetische Strahlung; umgekehrt kann aus solcher Strahlung ein Teilchen-Antiteilchen-Paar entstehen. Da sich der Kosmos im Zuge seiner Expansion immer mehr abkühlt, reicht irgendwann die Energie der thermischen Strahlung für die Paarerzeugung aber nicht mehr aus.

Eine Welt aus Branen

Bei Karch und Randall füllen statt der Elementarteilchen unendlich ausgedehnte Branen ein expandierendes Universum mit neun Raumdimensionen. Auch sie können sich paarweise vernichten oder spontan entstehen. Die Wahrscheinlichkeit einer wechselseitigen Annihilation hängt allerdings von der Anzahl der Raum- wie der Brandimensionen ab. Vereinfacht gesagt, haben zwei punktartige Null-Branen im neundimensionalen Raum jede Menge Möglichkeiten, sich zu verfehlen und der gegenseitigen Vernichtung zu entgehen. Zwei Neun-Branen dagegen können sich überhaupt nicht ausweichen. Bei genauerer Betrachtung ▷



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

◁ Wenn direkt übereinander liegende Drei-Branen durch Strings miteinander und mit bestimmten Sieben-Branen verbunden sind, erscheinen aus Sicht von Wesen, die auf der Drei-Bran leben, die dortigen String-Enden als punktförmige Elementarteilchen, die sich wie in der traditionellen Teilchenphysik verhalten.

▷ zeigt sich, dass in einem solchen Universum die Wahrscheinlichkeit der gegenseitigen Auslöschung für Branen mit mehr als drei Dimension dramatisch steigt.

Ein zweiter entscheidender Aspekt, den Karch und Randall berücksichtigen, ist die kosmische Expansion, durch die sich der gesamte Inhalt des Universums verdünnt. Hier zeigt sich, dass höherdimensionale Branen im Vorteil sind: Sie können ein größeres Teilvolumen des sich ausdehnenden Weltalls ausfüllen als ihre niederdimensionalen Pendants.

In dem Modell der beiden US-Forscher gibt es also zwei gegenläufige Tendenzen: Die Paarvernichtung begünstigt niederdimensionale und die Expansion höherdimensionale Branen. Daraus resultiert eine Häufigkeitsverteilung mit zwei Maxima. Als Sieger aus den widerstreitenden Trends gehen, wie sich zeigt, die Drei- und die Sieben-Branen hervor. Sie sollten den größten Teil des Universums ausmachen. Wählt man zufällig einen Raumpunkt, landet man demnach mit deutlich höherer Wahrscheinlichkeit auf einer Drei- oder Sieben- als beispielsweise auf einer Fünf-Bran. Das nun könnte erklären, warum wir in einem dreidimensionalen Raum leben. Er würde von einer der besonders häufigen Drei-Branen gebildet, die ähnlich in den neundimensionalen Kosmos eingebettet wäre wie ein zweidimensionales Blatt Papier in unsere dreidimensionale Welt.

Welche Rolle aber spielen in dem Modell die zusätzlichen Sieben-Branen? Ein unbedarfter Laie mag sie als störend empfinden, aber unerschrockene Theoretiker vermögen selbst diesen seltsamen Gebilden, die sich unserer Wahrnehmnung entziehen, noch etwas Gutes abzugewinnen. In der Stringtheorie können Strings nämlich wie eine Art mikroskopischer Wäscheleine zwischen verschiedenen Branen aufgespannt sein. In diesen bleiben sie dann für immer verankert. Karch und Randall betrachten nun den Fall direkt übereinander liegender Drei-Branen, welche durch Strings miteinander und mit bestimmten Sieben-Branen verbunden sind. Und siehe da: Aus Sicht von Wesen, die auf der Drei-Bran leben, würden die darauf gefangenen String-Enden als punktförmige Elementarteilchen erscheinen, die genau so miteinander wechselwirken wie in der herkömmlichen Teilchenphysik.

Das Modell von Karch und Randall gibt also eine faszinierende Antwort ▷

INTERVIEW

»Wir müssen die Zusammensetzung des globalen Methanbudgets neu beschreiben«

Als natürliche Quelle des zweitwichtigsten Treibhausgases neben Kohlendioxid galten bisher vor allem anaerobe Mikroorganismen in Feuchtgebieten, Reisfeldern und Mägen von Wiederkäuern. **Frank Keppler** vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg fand jetzt zusammen mit Wissenschaftlern von zwei weiteren Forschungseinrichtungen in Europa etwas völlig Unerwartetes: Auch Pflanzen produzieren Methan – und das in erheblichen Mengen.

Wie kamen Sie eigentlich auf die Idee, Pflanzen könnten Methan freisetzen? Das widerspricht doch jeglicher Lehrbuchmeinung.

Natürlich scheint es zunächst abwegig, den Methanausstoß von Pflanzen zu untersuchen – galten doch anaerobe Mikroorganismen als Hauptproduzenten dieses Gases. Allerdings hatten wir schon vor einigen Jahren herausgefunden, dass Pflanzen Chlormethan emittieren. Von hier war der Schritt zum Methan nicht mehr allzu weit. Einen entscheidenden Hinweis lieferte uns auch das Verhältnis der Kohlenstoffisotope C-12 und C-13. Mit ihm konnten wir Vorläufermoleküle von Chlormethan in Pflanzen identifizieren. Außerdem ähnelt dieser isotopische Fingerabdruck, wie sich zeigte, auffallend dem des Methans über Reisfeldern und Feuchtgebieten. Da stellten wir uns natürlich die Frage, ob das Methan von den Pflanzen selbst stammen könnte.

ACHIM G. SCHNEIDER

Wie haben Sie den Methanausstoß von Pflanzen gemessen?

Um auszuschließen, dass Pflanzen lediglich zuvor aus der Umgebung aufgenommenes Methan wieder freisetzen, haben wir zunächst Blätter in abgedichteten Glasgefäßen mit methanfreier Luft gespült. Zudem haben wir Mikroorganismen mit Gammastrahlen abgetötet, um sie als Quelle auszuschließen. Vollständige Pflanzen haben wir mit Wasser gegossen, das mit C-13 markiertes Azetat enthielt – eine Substanz, die Bakterien zu Methan verstoffwechseln. Wäre auch nur ein Millionstel dieses Azetats umgesetzt worden, hätten wir das Isotop im Methan nachweisen können. Doch wir fanden keine Spur davon. Als Quelle des Gases blieb damit nur noch die Pflanze selbst übrig.

Stoßen denn alle Pflanzen Methan aus?

Jedenfalls alle, die wir bisher untersucht haben. Das sind dreißig verschiedene Arten für unsere Blattversuche und fünfzehn für unsere Experimente an lebenden Pflanzen. Letzere haben einen um ein bis zwei Größenordnungen höheren Methanausstoß als abgetrennte Blätter. Doch auch verschiedene Pflanzengruppen können sich um den Faktor 10 bis 20 unterscheiden. Besonders viel Me-

Frank Keppler schließt die Pflanzenkammer mit Weidelgras an Messapparaturen an, die den Gehalt an Methan und dessen isotopische Zusammensetzung messen.

FRANK KEPPLER

Bei dieser Methanmessung in Teresina (Brasilien) im Juni 2005 diente eine Kammer über nacktem Boden (rechts) zur Kontrolle.

than emittieren Gräser wie Mais, Weizen und Weidelgras.

Basierend auf Daten von wenigen Pflanzenarten rechnen Sie den Methanausstoß auf die globale Vegetation hoch. Wie verlässlich sind Ihre Zahlen?

Dies ist natürlich nur eine erste Schätzung, doch wir sind uns sicher, dass wir mit der Spanne von 60 bis 240 Millionen Tonnen Methan pro Jahr recht gut liegen. Für unsere Berechnungen haben wir die Nettoprimärproduktion an Pflanzenmasse in verschiedene Vegetationstypen untergliedert. Dabei haben wir auch die jeweilige Dauer der Wachstumsphase und des täglichen Sonnenscheins einbezogen. Wie wir nämlich aus unseren Untersuchungen wissen, erhöht sich der Methanausstoß im Sonnenlicht auf das Drei- bis Fünffache. Unser Modell kann übrigens auch die unerwartet hohe Methankonzentration über tropischen Wäldern erklären, die vor Kurzem bei Satellitenbeobachtungen festgestellt wurde.

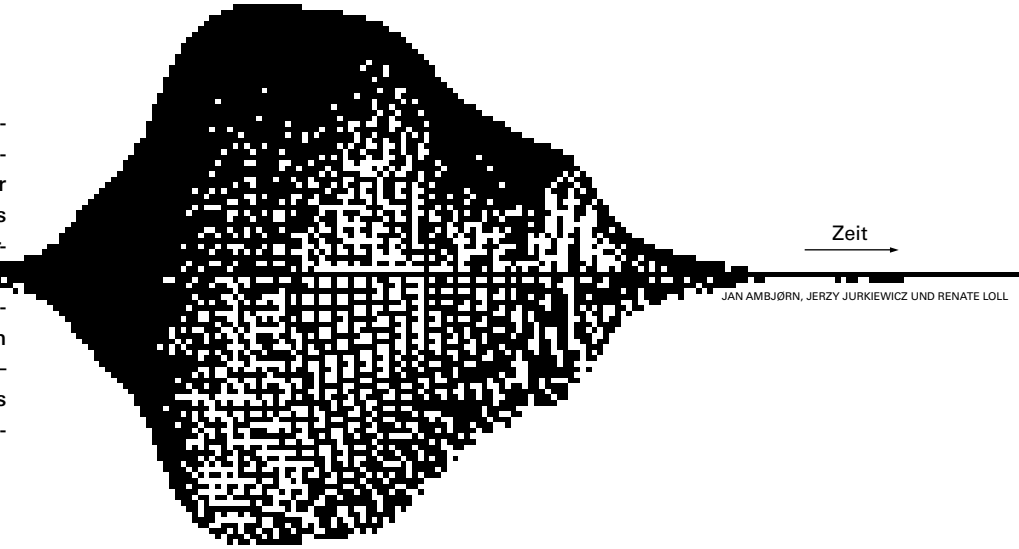
Am Gesamtbudget des Methans ändern Ihre Ergebnisse ja nichts. Ist es im Hinblick auf den Treibhauseffekt nicht egal, ob das Gas nur von Mikroorganismen oder teilweise auch von Pflanzen stammt?

Tatsächlich ist der Gesamtausstoß von Methan weit gehend bekannt. Bei den geschätzten weltweiten Emissionen von 500 bis 600 Millionen Tonnen jährlich bleibt aber immer noch Raum für – sagen wir mal – 50 Millionen Tonnen, die aus bisher unbekannten Quellen hinzukommen könnten. Außerdem spielt es für das Weltklima schon eine Rolle, woher das Methan stammt. Wenn Pflanzen wegen des steigenden Gehalts der Atmosphäre an Kohlendioxid und der dadurch verursachten globalen Erwärmung schneller wachsen, setzen sie auch mehr Methan frei. Das wiederum heizt die Atmosphäre weiter auf. In jedem Fall aber müssen wir die Zusammensetzung des globalen Methanbudgets neu beschreiben.

Welche Klimaschutzmaßnahmen wären jetzt zu überdenken?

Dafür ist es noch zu früh. Bei Aufforstungsprogrammen muss man möglicherweise den Effekt der Methanfreisetzung in die Bilanz der Treibhausgase einbeziehen. Bäume liefern einen Beitrag zum Klimaschutz, indem sie Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernen. Ich gehe davon aus, dass dieser Nutzen durch den Ausstoß von Methan nur wenig geschmälert wird.

Die Fragen stellte **Achim G. Schneider**, freier Wissenschaftsjournalist in Freiburg.



JAN AMBJØRN, JERZY JURKIEWICZ UND RENATE LOLL

Mit einem Verfahren, das als kausale dynamische Triangulierung bezeichnet wird, lassen sich im Computer Modelluniversen erzeugen. Ein solches Universum ist hier in der Raum-Zeit-Darstellung wiedergegeben. Aus mikroskopischen Anfängen (links) bläht es sich im Lauf der Zeit zu stattlicher Größe auf – der Umfang des spindelartigen Gebildes nimmt zu –, bevor es wieder in sich zusammenfällt (rechts).

auf die Frage, wieso unsere Welt gerade dreidimensional ist. Noch ist es allerdings lückenhaft. So kann es bisher nur vage erklären, wieso sich die Gravitation auf der Branwelt so verhält wie in unserem dreidimensionalen Kosmos.

Wessen Vorstellungskraft die Komplexität der Stringtheorie überfordert, dem sei zum Trost gesagt, dass nicht alle Ansätze zur Vereinigung von Allgemeiner Relativitäts- und Quantentheorie höhere Dimensionen bemühen. Viele gehen auch schlicht von unserem normalen dreidimensionalen Raum aus. Aber Vorsicht! Sie müssen deshalb keineswegs bei ebendiesem Raum enden. Das haben Forscher wie Jan Ambjørn vom Niels-Bohr-Institut in Kopenhagen, Jerzy Jurkiewicz von der Jagellonischen Universität Krakau und Renate Loll von der Universität Utrecht in den letzten Jahren gezeigt.

All diese Ansätze, denen unseren Alltagsraum zu Grunde liegt, greifen ein Verfahren des US-Physikers Richard Feynman auf, um die Entwicklung eines Quantensystems zu beschreiben: Um die Wahrscheinlichkeit auszurechnen, dass beispielsweise ein Elementarteilchen, das sich an der Stelle A befindet, eine bestimmte Zeit später am Ort B anzutreffen ist, werden alle möglichen Wege, auf denen es von A nach B hätte gelangen können, nach einem genau definierten Rezept aufsummiert. Die Kosmologen berechnen nun auf analoge Weise die Wahrscheinlichkeit, dass das Universum als Ganzes von einem Zustand (A) in einen anderen (B) gelangt. Sie ergibt sich in diesem Fall als Summe aller dynamisch veränderlichen Raumgeometrien, das heißt aller möglichen Weiterentwicklungen des gesamten Kosmos, die den Übergang von A nach B erlauben.

Um solch eine Summe überhaupt definieren zu können, werden zunächst Näherungsuniversen betrachtet. Deren gekrümmte Geometrie ist aus planaren Bausteinen endlicher Größe zusammengesetzt. Auch im zweidimensionalen Fall kann man ja eine gewölbte Oberfläche so gut wie lückenlos mit kleinen, ebenen Fliesen auslegen. Diese zwei- oder höherdimensionale Fliesenlegerei heißt in der Mathematik Triangulierung.

Verkorkste Universen

Da die Bausteine in den hier betrachteten Modellen vierdimensional sind (unter Einschluss der Zeit), könnte man meinen, dies gelte zwangsläufig auch für das daraus konstruierte Weltall. Weit gefehlt! Solche Bausteine können sich in überraschender Weise zusammenlagern und dabei Universen mit einer anderen Zahl von Dimensionen bilden. Wenn sie sich etwa wie die Atome eines Polymers verketten, ist der entstehende Raum ein Geflecht aus quasi eindimensionalen Fasern. Umgekehrt können sie sich so ineinander schieben, dass ein Teilchen von jedem Punkt aus die Möglichkeit hat, sich in mehr als die üblichen drei unabhängigen Richtungen fortzubewegen. Dann zählt der Raum mehr als drei Dimensionen. Einige Ansätze scheinen sogar nur solche verkorksten Polymer- oder absurd höherdimensionalen Universen hervorzubringen.

Jüngst haben Ambjørn, Jurkiewicz und Loll nun aber ein Modell entwickelt – sie bezeichnen es als kausale dynamische Triangulierung –, das nicht von solchen Problemen geplagt wird. Das bewiesen sie mit einer Methode, die einen sehr anschaulichen physikalischen Hintergrund hat: Ein Gas aus vielen durcheinander fliegenden Teilchen, das man in eine Raumregion einbringt, diffundiert mit der Zeit. In einem dünnen Rohr kann es allerdings nur nach zwei Seiten auseinander laufen. Dort verdünnt sich die Gaswolke deshalb langsamer, als wenn sie sich in alle drei Raumrichtungen ausdehnen kann. Wie schnell sich das Gas verläuft, hängt somit von der Anzahl der Dimensionen ab. Mit einem mathematischen Analogon dieses Prozesses erkundeten Ambjørn und seine Kollegen die Dimensionalität repräsentativer Modelluniversen, die sie in einer numerischen Simulation erzeugt hatten.

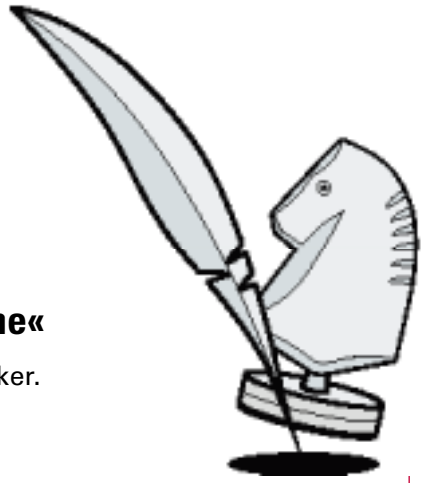
Das Ergebnis: Mit der kausalen dynamischen Triangulierung lassen sich die verkorksten Universen vermeiden, die aus anderen Ansätzen auf der Basis Feynman'scher Pfadintegrale hervorgehen. Auf makroskopischen Größenskalen kommt in diesem Modell tatsächlich ein Kosmos mit dreidimensionalem Raum heraus. Im submikroskopischen Bereich gilt das allerdings nicht; dort erweist sich der Raum überraschenderweise als näherungsweise zweidimensional – was Konsequenzen für die Physik der Elementarteilchen in einem solchen Universum haben könnte. Auf die Frage nach der Zahl der Dimensionen antworten Ambjørn, Jurkiewicz und Loll daher erst einmal mit der Gegenfrage: Welche Größenskala darf's denn sein?

All diese Modelle sind bisher freilich graue Theorie. Vorerst gibt es keine Beobachtungs- oder Experimentaldaten, die einen der Ansätze zur Vereinigung von Gravitations- und Quantentheorie vor den anderen auszeichnen würden. Letztlich loten die Theoretiker nur das Meer der Möglichkeiten aus. Jeder hofft, den dicken Fisch – also das richtige Modell – an der Angel zu haben. Bis der Sieger feststeht, dürfte indes noch viel Geistesakrobatik vonnöten sein.

Markus Pössel ist promovierter Physiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam.

Springers
EINWÜRFE

von Michael Spr



»Physiker sind Kampfhähne«

... krähte einer und erntete Gegacker.

Wir alle wissen doch, wie Forschung funktio
nichts als der Wahrheit verpflichtet, bastel
te in aller Stille an Hypothesen und Versuchsaufbauten, bis sie der rettende Geistesblitz durchfährt, welcher nach weidlicher Prüfung publiziert und von den Kollegen neidlos bewundert wird.

Wir wissen aber auch, dass das so nicht stimmt. Im privaten Gespräch erzählen Wissenschaftler – manchmal lachend, manchmal bitter – von Platzhirschen, die eifersüchtig ihr Terrain abschotten, und von eitlen Selbstdarstellern, welche die gemeinsame Arbeit des Teams als ihre ureigenste Leistung ausgeben. Da gibt es Gutachter, die aus Konkurrenzneid eher wie Schlechtachter agieren, und Vortragende, die im Kongresspublikum ihre Claqueure platzieren, damit in der Diskussion auch sicher die gewünschten Fragen kommen.

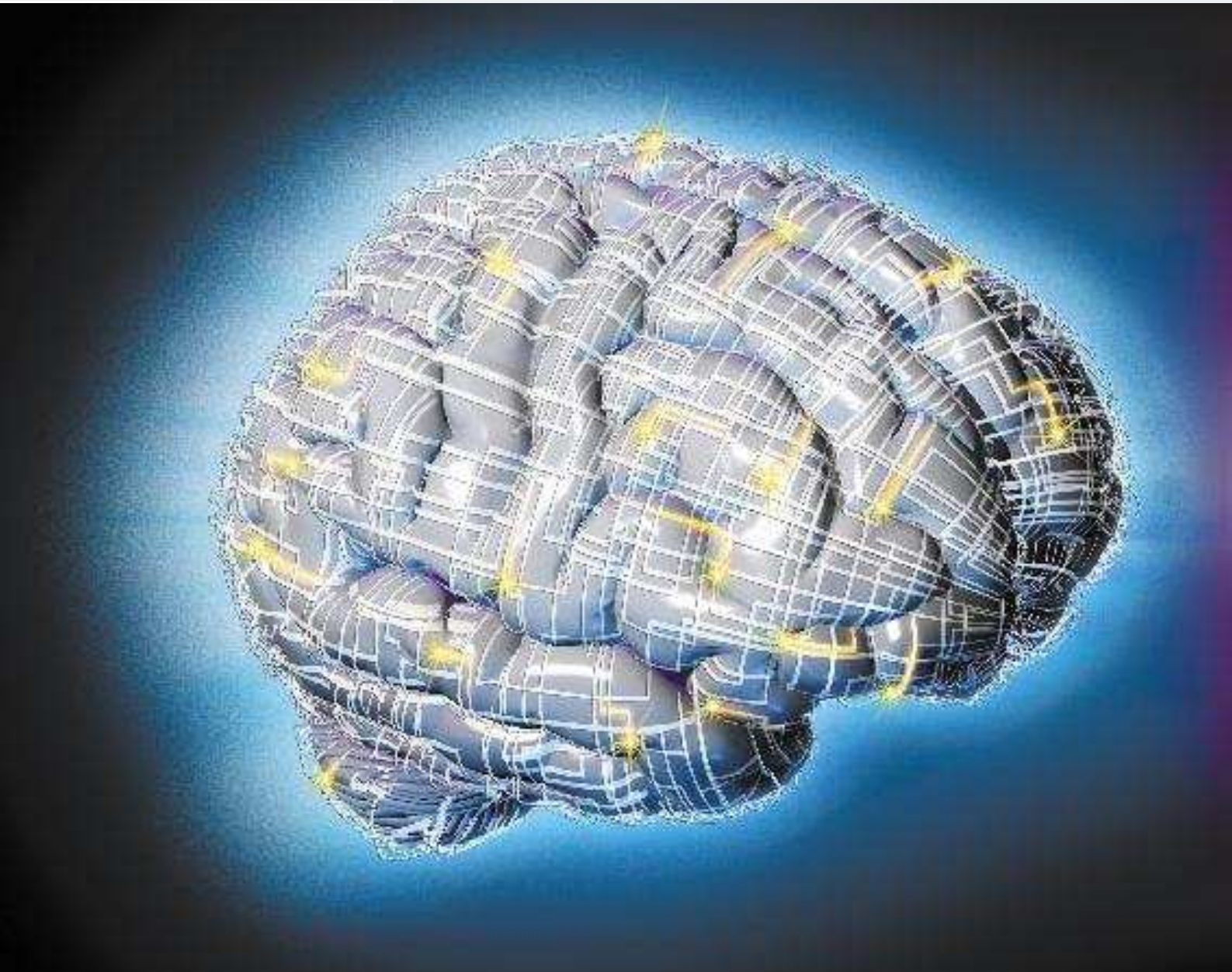
Von derlei Folklore bleibt die Öffentlichkeit normalerweise ausgeschlossen. Doch nun hat Ad Lagendijk, Physikprofessor an den Universitäten Amsterdam und Twente in den Niederlanden, das Tabu gebrochen: Nach seiner täglichen Erfahrung, bekennt er öffentlich, herrscht in der Forschergemeinde ein gnadenloser Wettkampf um Macht und Erfolg. Auf wissenschaftlichen Tagungen sehe er eine Ansammlung aggressiver Männer, er betone Männer, die um ihren Status kämpften oder bestenfalls um winzige Erkenntnisfortschritte. Erfolgreiche Forscher reisten unentwegt um die Welt und produzierten sich wie Zirkusclowns, um mit aller Gewalt ihre Leistung unters Volk zu bringen. In der Physik herrsche ein *struggle for life* à la Darwin *(Nature, Bd. 438, S. 429)*.

Solche Ausbrüche sind schon allein deshalb unüblich, weil sie automatisch den Verdacht wecken, hier klage ein zu kurz Gekommener. Doch Lagendijks Team hat eine eindrucksvolle Publikationsliste bei der Erforschung komplexer photonischer Systeme vorzuweisen. Eher scheint es sich also um eine bewusst kontrastreiche Gegendarstellung zum üblichen Bild zu handeln, in der Absicht, Reaktionen zu provozieren.

Das ist dem Tabubrecher auch gelungen. Mehrere Leserbriefe gehen auf seine schrillen Behauptungen ein – mit unterschiedlichem Tenor *(Nature, Bd. 439, S. 18)*. Ein Physiker aus Kalifornien deutet an, vielleicht herrsche die geschilderte Messerstecherwelt in Holland; bei ihm daheim jedenfalls sei Wissenschaft kein dauernder Kampf, sondern ein lebenslanges Abenteuer. Hingegen geben drei New Yorker Biologinnen dem Provokateur völlig Recht: Das derzeit herrschende »archaische und kurzsichtige Wertesystem« hemme den wissenschaftlichen Fortschritt und gehöre verändert. Zwei österreichische Botaniker – ein Mann und eine Frau – meinen, so brutale Zustände hätten sie zwar in ihrem Fach noch nicht erlebt, vielleicht wegen des in der Biologie höheren Frauenanteils, aber unter Physikern sei das offenbar anders.

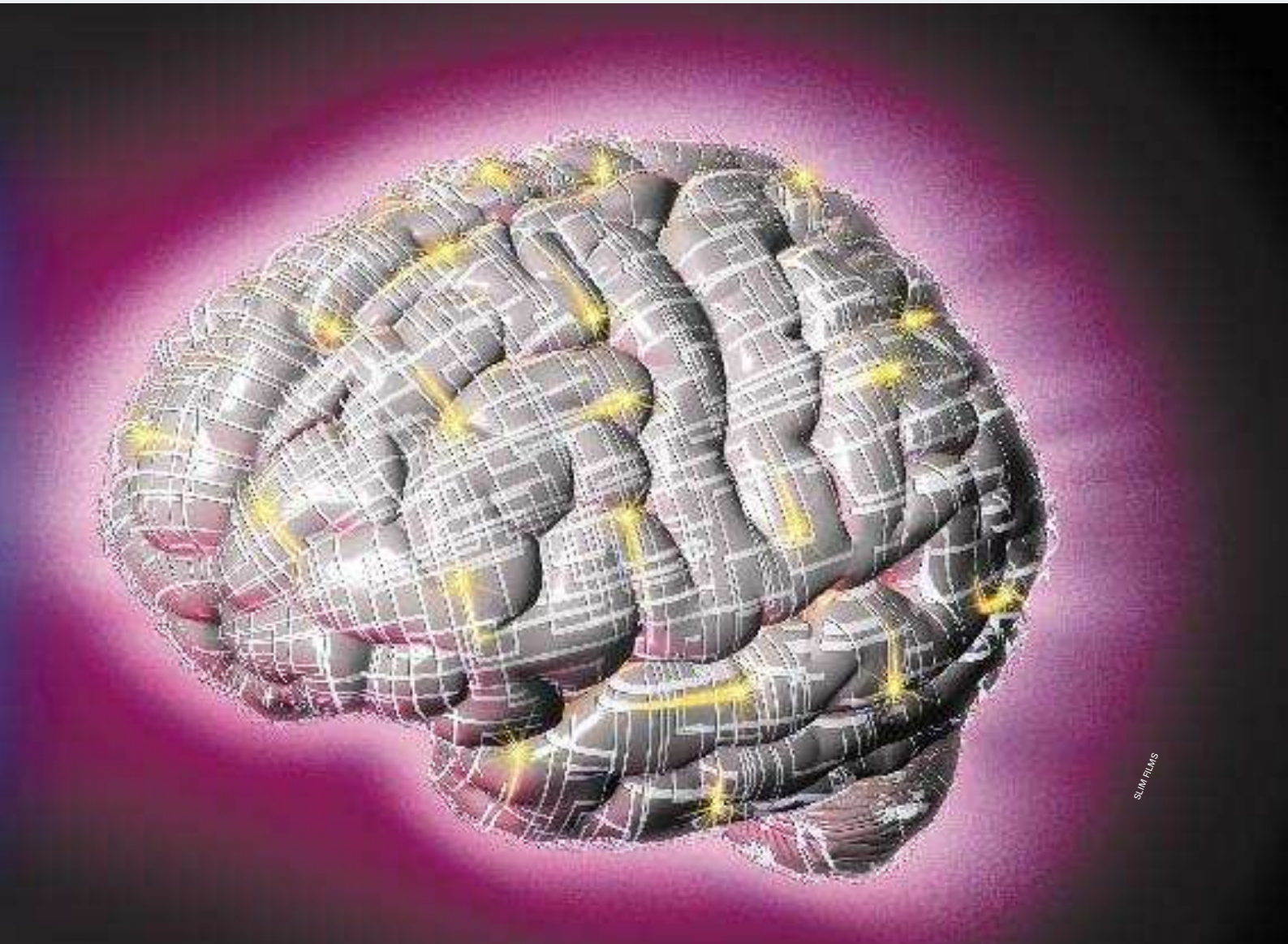
Michael Springer

Ich finde, Lagendijk kann mit der Resonanz auf seinen Rundumschlag ganz zufrieden sein. Gewiss hat er kräftig überzogen, aber eine bloß ausgewogene Betrachtung über unschöne Auswüchse des an sich kooperativen Forschungsbetriebs wäre rasch vergessen worden. So gilt für seinen schmetternden Weckruf das Gleiche wie für Forscher, die durch nicht immer blitzsaubere Tricks dafür sorgen, dass ihre Arbeit nicht unbemerkt bleibt: Was hilft das interessanteste Ergebnis, wenn es keinem auffällt.



Sein Gehirn, ihr Gehirn

Männer und Frauen sind durchaus nicht völlig gleich, was Bau und Funktion ihres Gehirns anbelangt. Einige der Unterschiede, die gerade erforscht werden, könnten geschlechtsspezifische Behandlungen von Krankheiten wie Depression und Schizophrenie nötig machen.



SLIM FILMS

Die Unterschiede zwischen männlichem und weiblichem Gehirn beschränken sich keineswegs nur auf Strukturen, die hauptsächlich mit der Kontrolle des Fortpflanzungsverhaltens zu tun haben.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe www.spektrum.de/audio

Von Larry Cahill

Warum sind Frauen in den Naturwissenschaften vergleichsweise rar? Ein Grund könnten angeborene Unterschiede zwischen männlichem und weiblichem Gehirn sein, meinte Lawrence Summers auf einer Konferenz im Januar letzten Jahres. Der Präsident der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) heizte mit seiner Bemerkung eine jahrhundertealte Debatte neu an. Geführt wird sie, seit Hirnvermessung Mode wurde und einige Wissenschaftler die angebliche intellektuelle Unterlegenheit der Frau mit dem durchschnittlich geringeren Hirnvolumen begründeten.

Doch bis heute existiert kein einziger Beleg, dass anatomische Unterschiede Frauen daran hindern würden, akademische Ehren in Mathematik, Physik oder den Ingenieurwissenschaften zu erlangen (siehe Kasten S. 35). Ganz eindeutig gleicht das weibliche dem männlichen Gehirn in vielerlei Hinsicht. Allerdings haben Forscher seit dem letzten Jahrzehnt eine erstaunliche Palette an strukturellen, chemischen und funktionellen Unterschieden erkannt.

Diese Ungleichheiten sind nicht bloß interessante Eigenheiten, die vielleicht erklären, warum mehr Männer als Frauen die Marx Brothers gut finden. Vielmehr dürften sie es womöglich nötig machen, geschlechtsspezifische Behandlungen für eine Reihe von Krankheitsbildern zu entwickeln, darunter Depression, Sucht, Schizophrenie und posttraumatische Belastungs- ▷

▷ störungen. Ferner bedeutet die Existenz solcher Unterschiede, dass Wissenschaftler, die sich mit Struktur und Funktion des Gehirns beschäftigen, bei der Datenanalyse das Geschlecht ihrer Versuchsobjekte berücksichtigen und künftig sowohl Frauen als auch Männer untersuchen müssen, wenn sie keine irreführenden Ergebnisse riskieren möchten.

Vor nicht allzu langer Zeit glaubten Neurowissenschaftler noch, Geschlechtsunterschiede im Gehirn beschränkten sich vorwiegend auf jene Regionen, die für das Fortpflanzungsverhalten zuständig seien. Das illustriert ein entsprechender Übersichtsartikel von 1966 im amerikanischen Mutterblatt von Spektrum der Wissenschaft. Damals beschrieb Seymour Levine von der Universität Stanford (Kalifornien), wie Geschlechtshormone bei Ratten dazu beitragen, die unterschiedlichen reproduktiven Verhaltensweisen zu steuern. Männchen steigen auf, während Weibchen den Rücken nach unten durchdrücken und dabei das Hinterteil hochrecken, um Freier zu ermuntern. Levine erwähnte als einzige Region den Hypothalamus: eine kleine Struktur an der Hirnbasis unterhalb des Thalamus, des Sehhügels. Sie ist wichtig für die Regulation der Hormonproduktion und steuert so Elementares wie Nahrungs- und Flüssigkeitsaufnahme sowie sexuelle Aktivität.

Eine ganze Generation von Neurowissenschaftlern reifte in dem Glauben heran, geschlechtsspezifische Unterschiede im Gehirn hätten in erster Linie mit Fortpflanzung, Sexualhormonen und dem Hypothalamus zu tun. Als Irrtum entlarvt wurde dies mittlerweile durch eine Flut von Ergebnissen, die den Einfluss des Geschlechts auf viele Bereiche der Kognition und des Verhaltens herausstreichen. Dazu gehören Gedächtnis, Emotionen, Sehen, Hören, das Verarbeiten von Gesichtern und die Reaktion des Gehirns auf Stresshormone. Beschleunigt hat sich der Fortschritt noch in den letzten fünf bis zehn Jahren durch den zunehmenden Einsatz eleganter bildgebender Verfahren wie Positronen-Emissions-Tomografie (PET) und funktionale Kernspintomografie, auch funktionale Magnetresonanztomografie genannt. Sie verschaffen von außen Einblick in das Gehirn eines lebenden Versuchsobjekts.

Von Geburt an verschieden – auch bei der Wahl des Spielzeugs

Die Bildgebung offenbarte anatomische Unterschiede in einer Reihe von Regionen quer durchs Gehirn. Zum Beispiel vermaß eine Forschergruppe um Jill M. Goldstein von der Harvard Medical School in Cambridge (Massachusetts) kernspintomografisch viele Bereiche der Hirnrinde, des Cortex, sowie der tieferen Strukturen. Unter anderem stellte das Team fest, dass Teile der Stirnrinde, Sitz vieler höherer kognitiver Funktionen, bei Frauen massiger sind als bei Männern – ebenso Teile des limbischen Cortex, der bei emotionalen Reaktionen mitwirkt (siehe Kasten rechts). Bei Männern hingegen sind Bereiche des Schläfenlappens, mitzuständig für räumliche Fähigkeiten, größer. Gleiches gilt für die Amygdala: Die beidseits vorhandene mandelförmige Struktur reagiert auf emotional erregende Informationen – auf alles, was das Herz zum Schlagen und den Adrenalinausstoß in Gang bringt. Wohlgemerkt handelt es sich auch im Weiteren stets um relative, nicht um absolute Größenunterschiede: Sie beziehen sich auf das Volumen einer Struktur im Verhältnis zu dem von Großhirn oder gesamtem Gehirn.

Nach allgemeinem Verständnis spiegelt sich im Größenverhältnis die relative Bedeutung einer Hirnstruktur für ein Tier wider. Zum Beispiel verlassen sich Primaten mehr auf ihren Seh- als ihren Hörsinn. Für Ratten gilt das Gegenteil. Entsprechend sind im Gehirn von Primaten anteilig größere Bereiche für den Sehsinn reserviert, bei Ratten hingegen mehr für den Riechsinn. Die verbreitete hirnanatomische Ungleichheit zwischen Männern und Frauen lässt also vermuten, dass das Geschlecht tatsächlich die Funktionsweise des Organs beeinflusst.

Selbst auf der Ebene von Zellen treten solche Sexualunterschiede zu Tage. Zum Beispiel entdeckten Sandra Witelson und ihre Kollegen an der McMaster-Universität in Hamilton (Kanada), dass Teile der weiblichen Schläfenrinde, die mit Sprachverarbeitung und -verständnis zu tun haben, eine höhere Dichte von Neuronen aufweisen. Das war bei zwei der sechs Lagen in der Rinde der Fall. Ausgezählt wurde die Anzahl der Nervenzellen pro Volumeneinheit an Gewebeproben von Verstorbenen. Ähnliches ergab sich später auch für den Stirnlappen. Bleibt nun zu untersuchen, ob geschlechtsspezifische Unterschiede in der Neuronenzahl mit solchen in kognitiven Fähigkeiten einhergehen – ob etwa die höhere Dichte in der weiblichen Hörrinde mit einem besseren Abschneiden in Tests zur Sprachflüssigkeit korreliert.

Zu Stande kommen dürfte eine derartige anatomische Variation großenteils durch die Geschlechtshormone, in denen das Gehirn des Fetus regelrecht badet. Sie wirken lenkend auf die Organisation und Verdrahtung des sich entwickelnden Organs und beeinflussen Struktur und Neuronendichte verschiedener Bereiche. Interessant ist, dass die Hirnregionen, die Goldstein bei Männern und Frauen als unterschiedlich erkannt hat, bei Tieren während der Entwicklung die meisten Rezeptoren für Geschlechtshormone tragen. Diese Korrelation zwischen der Größe einer Hirnregion bei Erwachsenen und der Wirkung von Sexualhormonen in der Gebärmutter deutet darauf hin, dass zumindest einige der geschlechtsspezifischen Unterschiede in den kognitiven Funktionen nicht durch kulturelle Einflüsse oder hormonelle Änderungen während der Pubertät entstehen – sie sind von Geburt an vorhanden.

Dafür sprechen auch mehrere interessante Verhaltensstudien. Im Lauf der Jahre zeigten viele Forscher, dass sich bei der Wahl von Spielzeug die Wege von Jungen und Mädchen trennen. Erstere zieht es eher zu Bällen und Spielzeugautos, Letztere hingegen eher zu Puppen. Bislang konnte allerdings niemand wirklich sagen, ob diese Vorlieben kulturell

IN KÜRZE

▶ **Anatomische, chemische und funktionale Unterschiede** zwischen den Gehirnen von Männern und Frauen sind inzwischen quer durch das Organ nachzuweisen – in Bereichen, die mit Sprache, Gedächtnis, Gefühlen, Sehen, Hören und Orientierung zu tun haben.

▶ Forscher arbeiten an der Frage, wie diese Unterschiede mit solchen in der Kognition und im Verhalten beider Geschlechter zusammenhängen. Ihre Entdeckungen könnten zu **geschlechtsspezifischen Behandlungen** für Männer und Frauen mit Problemen wie Schizophrenie, Depression, Sucht und posttraumatischen Belastungsstörungen führen.

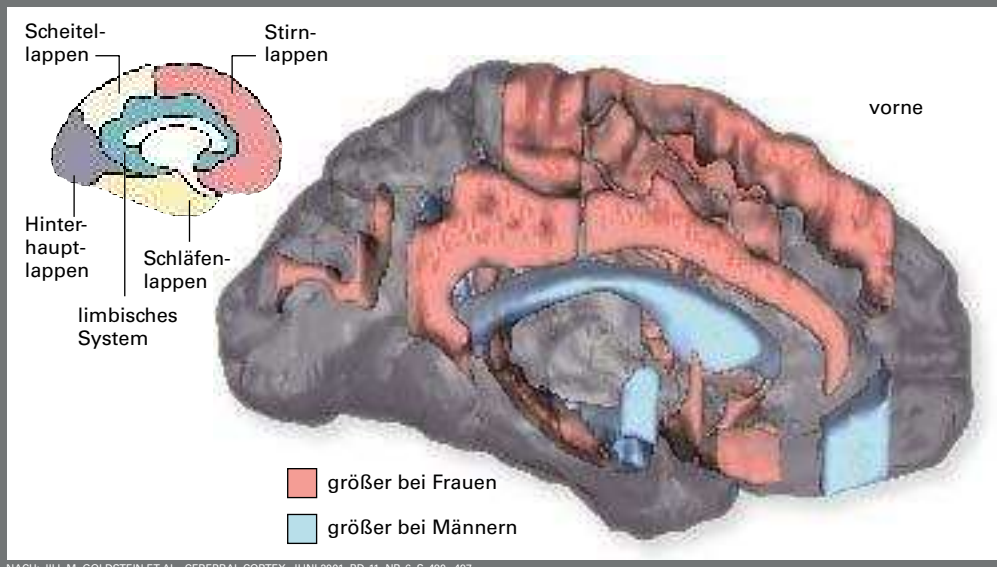
oder durch die angeborene Hirnbiologie bedingt sind.

Um diese Frage anzugehen, wendeten sich Melissa Hines von der Stadt-Universität in London und Gerianne M. Alexander von der Texas-A&M-Universität in College Station unserer tierischen Verwandtschaft zu. Grüne Meerkatzen bekamen eine Auswahl an Spielzeug geboten, darunter Stoffpuppen, Lastwagen und einige »geschlechtsneutrale« Dinge wie Bilderbücher. Tatsächlich verbrachten männliche Meerkatzen mehr Zeit mit dem »Jungenspielzeug« als ihre weiblichen Artgenossen. Und diese wiederum befassten sich mehr mit Spielsachen, die typischerweise von Mädchen bevorzugt werden (siehe Kasten S. 32). Beide alberten aber gleich lang mit Bilderbüchern und anderem geschlechtsneutralen Spielzeug herum.

Da die Neigungen Grüner Meerkatzen wohl kaum durch den sozialen Druck menschlicher Kultur geprägt sind, implizieren diese Ergebnisse, dass auch Spielzeugvorlieben von Kindern zumindest teilweise auf angeborene biologische Unterschiede zurückgehen. Diese divergente Entwicklung und all die anatomischen Geschlechtsunterschiede im Gehirn sind vermutlich ein Ergebnis von Selektionsdrücken während der Evolution. Gemäß der Studie bevorzugt »er« – ob Mensch oder Affe – Spielzeug, das sich durch den Raum treiben lässt und spielerisches Rempeln und Balgen begünstigt. Somit scheint die Spekulation erlaubt, dass diese Eigenschaften mit Verhaltensformen zu tun haben dürften, die nützlich für die Jagd und die Sicherung einer Partnerin sind. Weibchen zöge es dagegen bevorzugt zu Spielsachen, die ihre Fähigkeiten schulen, Nachwuchs aufzuziehen.

Messbar verschieden

Verteilt über das Gehirn kommen anatomische Unterschiede zwischen den Geschlechtern zum Vorschein. Ein Team um Jill M. Goldstein von der Medizinischen Fakultät der Harvard-Universität bestimmte zum Beispiel das relative Volumen von ausgewählten Regionen der Hirnrinde im Vergleich zum Gesamtvolumen des Großhirns. Viele Bereiche erwiesen sich bei Frauen als relativ größer, darunter Teile von Stirnrinde und limbischem Cortex. Für manch andere Regionen hingegen war dies bei Männern der Fall. Ob die anatomischen Unterschiede sich in den kognitiven Fähigkeiten niederschlagen, ist nicht bekannt.



NACH: JILL M. GOLDSTEIN ET AL., CEREBRAL CORTEX, JUNI 2001, BD. 11, NR. 6, S. 490–497

Mädchen lieben lebende Gesichter

Auf andere, aber ebenfalls kreative Weise untersuchten Simon Baron-Cohen und seine Mitarbeiter an der Universität Cambridge (Großbritannien) den Einfluss von Natur versus Kultur auf Geschlechtsunterschiede. Viele Forscher haben beschrieben, wie unterschiedlich personenbezogen männliche und weibliche Kleinkinder sind. So stellten auch Baron-Cohen und seine Studentin Svetlana Lutchmaya fest, dass beispielsweise einjährige Mädchen mehr Zeit als gleichaltrige Jungen damit verbringen, ihre Mütter anzuschauen. Und wenn diese Kleinen zwischen verschiedenen Filmen wählen können, schauen die Mädchen länger auf einen Film von einem Gesicht, während die Jungen sich mehr für einen mit Autos interessieren.

Natürlich könnten diese Vorlieben durch die Art und Weise zu Stande kommen, wie Erwachsene mit Jungen und Mädchen umgehen oder spielen. Um diese Möglichkeit auszuschalten, gingen Baron-Cohen und seine Studenten einen Schritt weiter. Sie besuchten mit ihrer Videokamera die Säuglingsabteilung eines Krankenhauses und filmten die Reaktionen von Babys, die erst einen Tag alt waren. Die Kleinen sahen entweder live das freundliche Gesicht einer Studentin oder ein Mobile, das die Farbe, Größe und Form des Gesichts der Studentin hatte, deren Gesichtszüge aber in einem Durcheinander präsentierte. Um Voreingenommenheiten auszuschließen, wussten die Forscher zunächst nicht, welches Geschlecht das Baby hatte. Das Ergebnis: Die Mädchen verbrachten mehr Zeit damit, das lebende Gesicht anzuschauen, während die Jungen dem mechanischen Objekt den Vorzug gaben. Dass dieser Unterschied im sozialen Interesse bereits am ersten Lebenstag auftrat, legt erneut eines nahe: Uns sind einige kognitive Geschlechtsunterschiede bereits eingebaut, wenn wir zur Welt kommen.

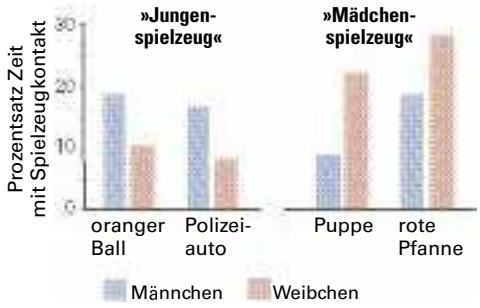
Anatomische, aber auch chemische Geschlechtsunterschiede im Gehirn beeinflussen in vielen Fällen, wie Männer und Frauen auf ihre Umwelt ansprechen oder wie sie auf stressreiche Erlebnisse reagieren und sich an diese erinnern. Beispiel Amygdala: Goldstein und anderen Forschern zufolge ist diese Struktur bei Männern größer. Und bei Ratten bilden die Nervenzellen von Männchen in dieser Region mehr Zwischenverbindungen aus. Dies ließ unterschiedliche Reaktionen auf Stress bei männlichen und weiblichen Individuen erwarten.

Katharina Braun und ihre Mitarbeiter von der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg trennten daher Degu-Babys für kurze Zeit von ihrer Mutter. Für diese sozialen südamerikanischen Nagetiere, die wie Präriehunde in großen Kolonien leben, ist selbst eine vorübergehende Trennung ziemlich enervierend. Hinterher maß das Team in verschiedenen Hirnregionen die Konzentration an ▷

Verdrahtete Vorliebe?

Meerkatzen, beobachtet von Gerianne M. Alexander von der Texas-A&M-Universität und Melissa Hines von der Londoner Stadt-Universität, bevorzugten je nach Geschlecht Spielzeug, das dem Stereotyp für Jungen oder Mädchen entspricht. Die Weibchen (oberes Foto) beschäftigten sich zum Beispiel länger mit Puppen, die Männchen (unteres Foto) hingegen mehr mit Lastwagen (Diagramm). Solche Muster legen nahe, dass die Vorlieben menschlicher Kinder nicht nur von ihrer Erziehung, sondern teilweise auch von ihrer neuralen Verschaltung abhängen.

AUS: G.M. ALEXANDER UND M. HINES, EVOLUTION AND HUMAN BEHAVIOR, NOV. 2002, BD. 23, NR. 6, S. 467–479; MIT FRDL. GEN. VON ELSEVIER



▷ Rezeptoren für den Nervenbotenstoff Serotonin, der entscheidend in emotionale Reaktionen involviert ist (er wirkt zum Beispiel stimmungsaufhellend).

Wenn die Degu-Babys während der Trennung die Rufe ihrer Mutter hören konnten, ließ dieser akustische Kontakt die Rezeptorkonzentration in der Amygdala von Männchen steigen, bei Weibchen hingegen sinken. Es ist zwar schwierig, von dieser Studie auf menschliches Verhalten zu schließen. Trotzdem deuten die Ergebnisse an, dass, falls Kindern etwas Ähnliches passiert, die Trennung sich je nach Geschlecht womöglich verschieden auf das emotionale Wohlbefinden auswirkt. Experimente wie diese sind notwendig, damit wir verstehen können, warum zum Beispiel Angststörungen weitaus häufiger Mädchen als Jungen betreffen.

Von einer weiteren Hirnregion ist inzwischen eine geschlechtsspezifische Anatomie und Stressantwort bekannt: dem Hippocampus, wichtig für das räumliche Gedächtnis (etwa, wie die Umgebung im Kopf kartiert wird) und das Einspeichern von Informationen. Bildgebende Untersuchungen belegen durchweg, dass der Hippocampus, das Ammonshorn, bei Frauen größer ist. Damit könnte durchaus die unterschiedliche Art und Weise zusammenhängen, wie Männer und Frauen navigieren. Mehrere Studien deuten darauf hin, dass Männer dazu eher Entfernung und Richtung abschätzen, während Frauen sich eher an Landmarken orientieren. Interessanterweise besteht ein ähnlicher Geschlechtsunterschied bei Ratten: Männchen finden ihren Weg durch ein Labyrinth eher anhand von Richtungs- und Positionsinformationen, Weibchen dagegen bevorzugt anhand von Landmarken.

Wer erträgt Stress besser?

Selbst die Nervenzellen im Hippocampus verhalten sich bei Männchen und Weibchen unterschiedlich, zumindest bei Erfahrungsreichtum. Ein Beispiel entdeckten Janice M. Juraska und ihre Mitarbeiter an der Universität von Illinois in Urbana. Sie hielten Ratten in Käfigen mit einem abwechslungsreichen Innenleben: Spielzeug und Artgenossen, um soziale Kontakte zu fördern. Die hippocampalen Nervenzellen von Weibchen entwickelten dann stärker verästelte Dendriten: baumkronenartige Verzweigungen, über die Signale von anderen Nervenzellen einlaufen. Dies spiegelt vermutlich einen Zuwachs an neuronalen Verknüpfungen wider, was wiederum – so glaubt man – mit dem Ablegen von Gedächtnisinhalten zu tun hat. Bei Männchen dagegen brachte die komplexe Umwelt keine bessere Verzweigung, teils lichtete sich die Krone sogar leicht.

Dafür können männliche Ratten aber manchmal unter Stress besser lernen. Wie ein Team um Tracey J. Shors von der Rutgers-Universität in New Brunswick (New Jersey) feststellte, verbesserte eine kurze Serie von Ein-Sekunden-Schocks die Ausführung einer erlernten Aufgabe bei Männchen. Außerdem erhöhte sich die Dichte von Verknüpfungspunkten an den Dendriten. Bei Weibchen war es genau umgekehrt (siehe Kasten auf der rechten Seite). In Ergebnissen wie diesen stecken interessante soziale Implikationen. Je mehr wir darüber herausfinden, wie sich die Lernmechanismen des Gehirns zwischen den Geschlechtern unterscheiden, desto dringlicher erscheint es zu überlegen, wie sich die optimalen Lernbedingungen für Jungen und Mädchen unterscheiden könnten.

Zwar kann der Hippocampus von weiblichen Ratten bei akutem Stress leiden, doch scheint er längeren Stress besser auszuhalten als sein männliches Gegenstück. Cheryl D. Conrad und ihre Mitarbeiter an der Staatsuniversität von Arizona in Tempe zwängten Ratten für sechs Stunden in Drahtkäfige – eine für die Nager verstörende Situation. Danach schauten die Forscher, wie verwundbar die hippocampalen Nervenzellen durch ein Neurotoxin waren. Dies ist ein Standardverfahren, um die Auswirkung von Stress auf Neuronen zu testen. Die männlichen Zellen erwiesen sich in dieser Hinsicht als geschwächt, die weiblichen aber nicht. Diese und ähnliche Ergebnisse deuten darauf hin, dass Weibchen anhaltenden Stress wohl besser tolerieren, gemessen an den Hirnschäden. Noch unklar ist, was ihre hippocampalen Zellen vor den schädlichen Auswirkungen von Stress schützt. Geschlechtshormone spielen dabei aber sehr wahrscheinlich eine Rolle.

Als meine Kollegen und ich die Frage weiter verfolgten, wie das Gehirn be-

lastende Ereignisse verarbeitet und im Gedächtnis behält, entdeckten wir, dass Männer und Frauen emotional aufwühlende Geschehnisse unterschiedlich abspeichern. In einem unserer ersten Experimente zeigten wir Freiwilligen eine Reihe von realistisch brutalen Filmen, während wir ihre Hirnaktivität per PET maßen. Ein paar Wochen später ließen wir sie einen Fragebogen ausfüllen, um zu sehen, was sie sich gemerkt hatten. Aus Forschungen an Tieren ist bekannt, dass Gedächtnisbildung mit einer Aktivierung der Amygdala einhergeht. Und tatsächlich: Je aktiver diese Hirnstruktur während der Vorführung war, an desto mehr der verstörenden Filme konnten sich die Personen erinnern. Anschließende Arbeiten aus unserem Labor und anderen bestätigten den Befund allgemein, aber merkwürdigerweise war bei einigen Studien die Amygdala ausschließlich in der rechten Hirnhälfte aktiv und bei anderen nur in der linken. An dem Punkt wurde mir bewusst, dass die Experimente, wo sie rechts »aufleuchtete«, nur Männer umfasste – und umgekehrt. Seitdem haben drei Anschlussstudien – zwei von unserer Gruppe und eine von einem Team um John Gabrieli und Turhan Canli in Stanford – den unterschiedlichen Umgang mit emotionalen Inhalten bestätigt (siehe Kasten S. 34).

Männer rechts – Frauen links

Welche Konsequenzen aber hat es, wenn männliche und weibliche Gehirne dasselbe emotional erregende Material unterschiedlich bei der Gedächtnisbildung verarbeiteten? Um dem nachzugehen, griffen wir auf eine jahrhundertealte Theorie zurück, wonach die rechte Hemisphäre eher die zentralen Aspekte einer Situation verarbeitet, während die linke eher für feinere Details zuständig ist. Wenn dies stimmt, sollte ein Wirkstoff, der die Aktivität der Amygdala drosselt, die Merkfähigkeit unterschiedlich beeinträchtigen: bei Männern stärker, was den Kern einer emotionalen Geschichte anbelangt, bei Frauen hingegen hinsichtlich genauer Details.

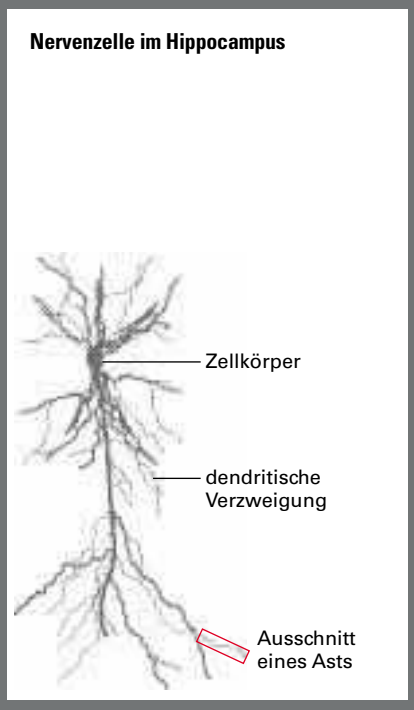
Propranolol ist ein solcher Arzneistoff. Dieser so genannte Beta-Blocker hindert Adrenalin und das verwandte Noradrenalin daran, ihre Wirkung an bestimmten Rezeptoren zu entfalten. Dadurch wird auch die Aktivität der Amygdala heruntergeschraubt und die Erinnerung an emotional aufregende Geschehnisse ▷

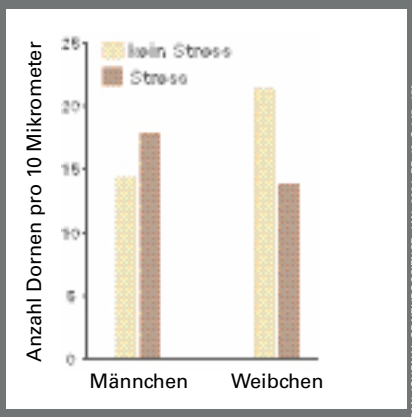
Das gestresste Ammonshorn

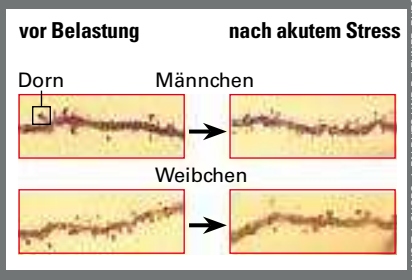
Der Hippocampus, das Ammonshorn, reagiert sowohl auf akuten als auch auf länger anhaltenden Stress bei männlichen Ratten anders als bei Weibchen.

Akuter Stress

Kurzzeitiger Stress steigert die Dichte so genannter dendritischer Dornen auf hippocampalen Nervenzellen bei Männchen, senkt sie aber bei Weibchen (Mikroaufnahmen und Diagramm rechts). Dies hat ein Forscherteam um Tracey J. Shors von der Rutgers-Universität festgestellt. Die Dornen sind Stellen, an denen die Dendriten, die verzweigten »Antennen« eines Neurons (links), erregende Signale von anderen Nervenzellen empfangen. Da der Hippocampus mit Lernen und Gedächtnis zu tun hat, könnte somit kurzzeitiger Stress anatomische Veränderungen induzieren, die das Lernen bei Männchen erleichtern und bei Weibchen erschweren.



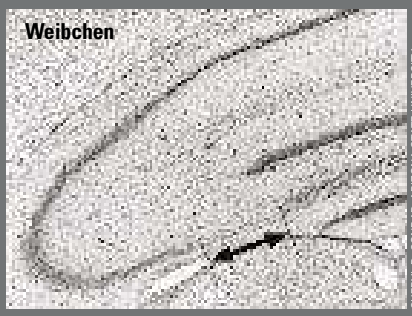




AUS: T.J. SHORS, J. FALDUTO UND B. LEUNER, EUROPEAN JOURNAL OF NEUROSCIENCE, JAN. 2004, BD. 19, S. 145–150

Dauerstress

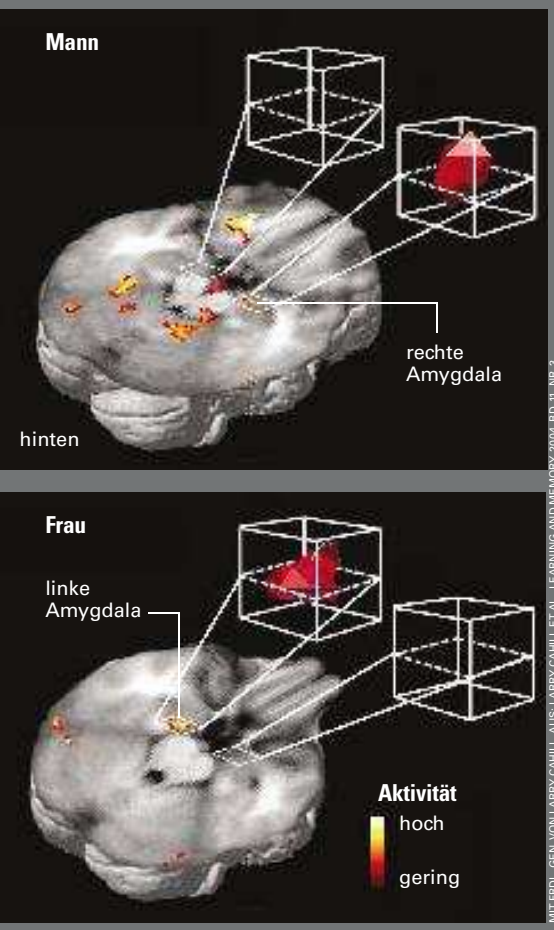
Längere Belastung kann dagegen den männlichen Hippocampus verletzbarer machen. Cheryl D. Conrad und ihre Mitarbeiter von der Staatsuniversität von Arizona setzten länger gestresste Ratten einem Nervengift aus. Die angerichteten Schäden waren im Vergleich zu vorher ungestressten Männchen größer, bei Weibchen fand sich kein Unterschied.



CHERYL D. CONRAD, ARIZONA STATE UNIVERSITY

Emotionsgeladen

Die Amygdala ist notwendig für das Einspeichern und Erinnern emotionaler Ereignisse. Wie der Autor und seine Mitarbeiter nachwiesen, reagiert diese beidseits vorhandene Hirnstruktur bei Männern und Frauen unterschiedlich, wenn sie Emotionen weckende Fotos anschauen, etwa von einem verwesenden Tier. Männer, die sich davon stark berührt fühlten, zeigten in ihrer rechtsseitigen Amygdala die höchste Aktivität (oberes Hirnbild) und zwei Wochen später dann die beste Erinnerung. Bei emotional besonders aufgewühlten Frauen mit später bester Erinnerung war dagegen die linksseitige Amygdala-Aktivität am größten (unteres Bild). Wie weitere Untersuchungen des Teams vermuten lassen, führen diese hemisphärenbezogenen funktionellen Geschlechtsunterschiede dazu, dass Frauen mit höherer Wahrscheinlichkeit Details von emotionalen Ereignissen behalten, Männer dagegen eher den Hauptinhalt.



MIT FRDL. GEN. VON LARRY CAHILL, AUS: LARRY CAHILL ET AL., LEARNING AND MEMORY 2004, BD. 11, NR. 3

▷ geschwächt. Wir gaben Männern und Frauen das Mittel, bevor sie eine kurze Dia-Präsentation über einen kleinen Jungen sahen, der bei einem Spaziergang mit seiner Mutter einen fürchterlichen Unfall erleidet. Eine Woche später testeten wir ihr Gedächtnis. Ergebnis: Propranolol machte es Männern tatsächlich schwerer, sich an die mehr ganzheitlichen Aspekte der Story zu erinnern, etwa dass der Junge von einem Auto überfahren wurde. Bei Frauen beeinträchtigte es das Gedächtnis für Details am Rande, etwa dass der Junge einen Fußball unterm Arm trug.

Zusammen mit Antonella Gasbarri und anderen an der Universität L'Aquila (Italien) haben wir in einer neueren Studie belegt, dass sich eine unterschiedliche Rechts-Links-Reaktion fast sofort, noch beim Schauen, erkennen lässt. Freiwillige reagieren auf emotional unangenehme Fotos innerhalb von 300 Millisekunden mit einer Zacke in Aufzeichnungen ihrer elektrischen Hirnaktivität, und diese schnelle scharfe Zacke, genannt P300-Antwort, fiel bei Männern auf der rechten Hirnhemisphäre stärker aus. Bei Frauen erwies sie sich links als größer. Somit gibt es geschlechtsbezogene hemisphärische Unterschiede in der Verarbeitungsweise emotionaler Bilder schon innerhalb der ersten 300 Millisekunden – lange bevor man, wenn überhaupt, groß die Möglichkeit hat, bewusst zu interpretieren, was da zu sehen ist.

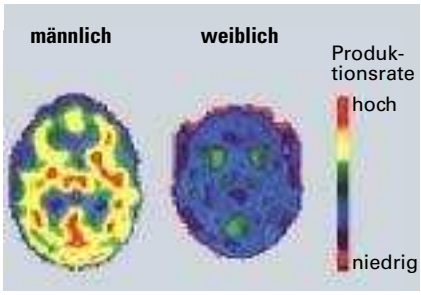
Diese Entdeckungen könnten für die Behandlung einer posttraumatischen Belastungsstörung (PTBS) von Belang sein. Gustav Schelling und seine Mitarbeiter an der Ludwig-Maximilians-Universität in München hatten zuvor festgestellt, dass Arzneistoffe wie Propranolol, wenn sie im Rahmen einer normalen Therapie auf Intensivstationen verabreicht werden, aufflackernde Erinnerungen der Patienten an traumatische Situationen abschwächen. Angeregt durch unsere Arbeiten entdeckten sie dann, dass Beta-Blocker bei Frauen, nicht aber bei Männern so wirken, zumindest in diesen Abteilungen. Selbst in der Intensivpflege müssen also unter Umständen Ärzte beim Bewerten einer medikamentösen Therapie das Geschlecht ihrer Patienten berücksichtigen.

PTBS ist nicht die einzige psychische Störung, die sich bei Männern und Frauen offenbar unterscheidet. So fanden Mirko Diksic und seine Kollegen an der McGill-Universität in Montreal (Kanada) bei einer PET-Studie, dass die untersuchten Männer im Mittel immerhin 52 Prozent mehr Serotonin herstellten als die Frauen (Bild unten). Das könnte miterklären, warum Frauen eher zu Depressionen neigen. Interessanterweise erhöht eine verbreitete Klasse von Antidepressiva die Einwirkdauer des Botenstoffs an den neuronalen Schaltstellen.

Geschlecht gesundheitsrelevant

Eine ähnliche Situation dürfte beim Suchtverhalten vorliegen. Der fragliche Neurotransmitter ist hier allerdings Dopamin: Die körpereigene Substanz hat mit dem Hochgefühl zu tun, das beim Drogenkonsum auftreten kann. Bei weiblichen Ratten steigerte Östrogen, wie ein Forscherteam um Jill Becker an der Universität von Michigan in Ann Arbor feststellte, die Ausschüttung von Dopamin in jenen Hirnregionen, die für die Regulation von drogengerichtetem Verhalten bedeutsam sind. Überdies hatte das Hormon einen lang anhaltenden Effekt: Es ließ weibliche Ratten mit höherer Wahrscheinlichkeit noch mehrere Wochen nach einer letzten Kokaingabe nach der Droge suchen. Solche Unterschiede in der Empfänglichkeit – besonders für Stimulanzien wie Kokain und Amphetamine – könnten erklären, warum Frauen den Wirkungen dieser Drogen wohl leichter erliegen und warum sie gewöhnlich schneller als Männer abhängig werden.

Ein weiteres interessantes Feld ist die Schizophrenie. Ruben Gur, Raquel Gur und ihre Kollegen an der Universität von Pennsylvania in Philadelphia haben jahrelang geschlechtsabhängige anatomische und funktionelle Unterschiede im Gehirn untersucht. Bei einem ihrer Projek-



MIRKO DIKSIC, MONTREAL NEUROLOGICAL INSTITUTE, MC GILL UNIVERSITY; AUS: PNAS BD. 94, S. 5308–5313, © 1997 NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA

Männer produzieren den Neurotransmitter Serotonin schneller, wie unter anderem diese PET-Untersuchung von Mirko Diksic und seinen Kollegen an der kanadischen McGill-Universität zeigt. Da Serotonin die Stimmung hebt, könnte dies miterklären, warum mehr Frauen unter Depressionen leiden.

Heikle Grauzone

Könnte es unter anderem an der Biologie des Gehirns liegen, dass weniger Frauen als Männer in den Naturwissenschaften Karriere machen? Diese Anmerkung von Lawrence Summer, Präsident der Harvard-Universität im amerikanischen Cambridge, auf einer Konferenz letzten Jahres stieß viele vor den Kopf.

Was sagt die Forschung dazu? Für einen Zusammenhang zwischen anatomischer Ungleichheit und intellektuellen Fähigkeiten finden sich schwerlich Indizien. Zunächst einmal: Bei standardisierten Tests zur generellen Intelligenz sind die Leistungsunterschiede der Geschlechter vernachlässigbar, manchmal sind Frauen etwas besser, manchmal Männer, aber nicht signifikant. Zwar entdecken Neurowissenschaftler gerade eine Vielzahl geschlechtsgebundener Unterschiede in der Struktur und Funktion des Gehirns. Bis jetzt vermag jedoch niemand zu sagen, ob diese Differenzen irgendeinen Einfluss auf den Karriereerfolg in naturwissenschaftlichen Bereichen haben – oder, wenn ja, wie ihr Einfluss im Vergleich zu dem von kulturellen Faktoren aussehen könnte.

Möglich ist allerdings, dass Männer und Frauen ihre gleich große allgemeine Intelligenz auf etwas verschiedenen Wegen erreichen. Zum Beispiel legt eine neuere Untersuchung nahe, dass die Geschlechter ihr Denkorgan unterschiedlich einsetzen, um Fragen, wie sie in Intelligenztests vorkommen, zu bearbeiten. Dazu benutzten Richard Haier und seine Kollegen an der Universität von Kalifornien in Irvine und der Universität von New Mexico in Albuquerque eine Kombination aus MRI-Scans und kognitiven Tests. Sie entwickelten Übersichtskarten, die das Volumen von grauer und weißer Substanz in verschiedenen Teilen des Gehirns mit dem Abschneiden in IQ-Tests korrelieren. Die graue Masse enthält Zellkörper von Neuronen, die Informationen im Gehirn verarbeiten; die weiße Substanz umfasst die langen Kabel, über die Nervenzellen Informationen an andere Zellen weiterleiten. Die Gruppe fand bei beiden Geschlechtern einen Zusammenhang zwischen dem Volumen von grauer oder weißer Substanz und dem Testerfolg – die Gehirnregionen, auf die diese Relation zutraf, waren allerdings bei Männern und Frauen nicht die gleichen.

CORBIS, RICK FRIEDMAN

Lawrence Summer, bedrängt von der Presse

Diese Ergebnisse wurden noch nicht von anderen Forschern bestätigt. Selbst dann aber bleibt eine Frage zu beantworten: Was, falls überhaupt, könnten solche Unterschiede damit zu tun haben, wie Männer und Frauen denken? Übrigens: Summer bewilligte inzwischen 50 Millionen Dollar zur Förderung von Frauen in den Wissenschaften.

Die Redaktion

te bestimmten sie die Größe des orbitofrontalen Cortex, der Stirnrinde in Höhe der Augen. Diese Region ist an der Kontrolle von Gefühlen beteiligt. Die Forscher ermittelten das Verhältnis zwischen Orbitofrontalregion und Amygdala, die eher mit dem Erzeugen von Gefühlen zu tun hat. Es erwies sich bei Frauen als bedeutend größer, was heißen könnte, dass sie im Schnitt emotionale Reaktionen besser in den Griff bekommen. In zusätzlichen Experimenten fanden die Forscher bei Frauen mit Schizophrenie – nicht unerwartet – ein kleineres Verhältnis als bei gesunden Frauen. Bei Männern aber war es merkwürdigerweise umgekehrt. Diese Ergebnisse bleiben weiterhin rätselhaft, lassen aber zumindest vermuten, dass Schizophrenie bei Männern und Frauen eine jeweils etwas andere Krankheit ist und somit die Behandlung auf das Geschlecht zugeschnitten werden müsste.

In einem umfassenden Bericht über Sexualunterschiede bei der Gesundheit betonte die angesehene amerikanische National Academy of Sciences 2001: »Das Geschlecht – ob man männlich oder weiblich ist – stellt eine wichtige grundlegende Variable beim Menschen dar. Es sollte bei der Konzeption und Auswertung von Studien auf allen Gebieten und auf allen Ebenen der biologisch-medizinischen gesundheitsrelevanten Forschung berücksichtigt werden.«

Neurowissenschaftler sind noch weit davon entfernt, all die geschlechtsbezogenen Unterschiede im Gehirn und ihren genauen Einfluss auf kognitive Fähigkeiten und Krankheitsanfälligkeit zu kennen. Forscher und Kliniker sind sich auch nicht immer über das beste weitere Vorgehen einig, um den vollen Einfluss des Geschlechts auf Gehirn, Verhalten und medikamentöses Ansprechen zu ermitteln. Aber für eine steigende Zahl von ihnen ist es mittlerweile undenkbar, wieder anzunehmen, dass man nur ein Geschlecht zu untersuchen braucht und damit genauso viel über das andere lernt. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Larry Cahill, außerordentlicher Professor in der Abteilung für Neurobiologie und Verhalten an der Universität von Kalifornien in Irvine, promovierte dort 1990 in Neurowissenschaften. Bei einem zweijährigen Aufenthalt in Deutschland untersuchte er mit bildgebenden Verfahren Lernen und Gedächtnis bei Wüstenrennmäusen. Er ist Mitglied des Zentrums für die Neurobiologie von Lernen und Gedächtnis in Irvine.

Vom ersten Tag an anders. Das männliche und weibliche Gehirn. Von S. Baron-Cohen. Walter Verlag, Düsseldorf und Zürich 2004

Brain gender. Von M. Hines. Oxford University Press, 2004

Exploring the biological contribution to human health: does sex matter? Von Th. M. Wizemann und M. Pardue (Hg.). National Academy Press, 2001

Male, female: the evolution of human sex differences. Von D. Geary. American Psychological Association, 1997

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Schwerkraft – eine Illusion?

Einer neuen Theorie zufolge lässt sich der Raum physikalisch als zweidimensionale Fläche beschreiben. In dieser Flachwelt laufen zwischen Teilchen und Feldern andere Wechselwirkungen ab als im dreidimensionalen Weltraum – und die Gravitation kommt gar nicht vor.

Von Juan Maldacena

Der Raum unserer Erfahrung hat drei Dimensionen: oben/unten, links/rechts, vorne/hinten. Zusammen mit der Zeit bilden sie die vierdimensionale Raumzeit. Also leben wir in einem Universum mit insgesamt vier Dimensionen – oder etwa nicht?

Erstaunlicherweise besagt eine neue physikalische Theorie, dass eine der drei Raumdimensionen eine Art Illusion sein könnte. Alle Teilchen und Felder, aus denen die Realität besteht, bewegen sich demnach in einer zweidimensionalen Welt – wie in dem Roman »Flächenland« des Briten Edwin A. Abott aus dem Jahr 1884. Auch die Gravitation wäre ein Teil dieser Einbildung: In der zweidimensionalen Welt gäbe es sie gar nicht, sie träte erst zusammen mit der scheinbaren dritten Dimension auf.

Genauer gesagt, die Anzahl der realen Dimensionen ist nach dieser Theorie Ansichtssache, und die Physiker können sich aussuchen, ob sie die Realität mit der einen Menge von Naturgesetzen – inklusive Gravitation – in drei Dimensionen beschreiben möchten oder mit der anderen Gesetzesmenge in zwei Dimensionen ohne Gravitation. Trotz der radikal unterschiedlichen Beschreibung umfassen beide Theorien alles, was wir rundum sehen und aus Daten über das Universum zu erschließen vermögen. Wir haben keine Möglichkeit, zu entscheiden, welche Theorie »wirklich« zutrifft.

Eine solche Behauptung stellt die Vorstellungskraft auf eine harte Probe. Und doch kennen wir ein analoges Phänomen aus der Alltagswelt. Ein Hologramm ist ein zweidimensionales Objekt, aber bei passender Beleuchtung erzeugt es ein dreidimensionales Bild. Die zur Beschreibung des räumlichen Bilds nötige Information ist im zweidimensionalen Hologramm enthalten. Ebenso gleicht gemäß der neuen physikalischen Theorie das gesamte Universum einem Hologramm (siehe »Das holografische Universum« von Jacob D. Bekenstein, Spektrum der Wissenschaft 11/2003, S. 34).

Das ist nicht bloß intellektuelle oder philosophische Spielerei. Eine in drei Dimensionen sehr schwierige Berechnung kann in zwei Dimensionen viel einfacher aussehen, und mitunter verwandelt sich dadurch ein unbeherrschbares physikalisches Problem in ein leicht lösbares. Zum Beispiel scheint die holografische Theorie bei der Analyse eines bestimmten experimentellen Resultats aus der Hochenergiephysik nützlich zu sein. Außerdem bietet sie einen neuen Zugang zu einer Quantentheorie der Gravitation, das heißt zu einer Beschreibung der Schwerkraft, welche die Prinzipien der Quantenmechanik ▷

IN KÜRZE

- Der **holografischen Theorie** zufolge entspricht unser räumlich dreidimensionales Universum inklusive Gravitation physikalisch einem zweidimensionalen Universum, das keine Gravitation enthält. Das dreidimensionale Universum geht aus dem zweidimensionalen ähnlich hervor wie ein räumliches holografisches Bild aus einem flachen Hologramm.
- Das **zweidimensionale Universum** existiert auf dem Rand des dreidimensionalen. Die Physik auf dieser Grenze ähnelt der starken Wechselwirkung mit Quarks und Gluonen. Die Physik im Innern enthält eine Quantentheorie der Gravitation – etwas, wonach Theoretiker seit Jahrzehnten suchen.
- Die **holografische Äquivalenz** verspricht einen neuen Zugang zur Beschreibung Schwarzer Löcher. Mathematisch ist die Theorie noch nicht streng bewiesen, aber ein neues Resultat hochenergetischer Teilchenexperimente scheint sie zu erhärten.

FOTO: CARY WOLINSKY; BEARBEITUNG: BRYAN CHRISTIE DESIGN

Die holografische Theorie setzt physikalische Gesetze, die in einem Volumen gelten, in Beziehung zu einem anderen Regelwerk, das auf einer Grenzfläche wirkt – hier symbolisiert durch die Jongleurin im Raum und ihr buntes zweidimensionales Abbild. Die Oberflächengesetze beschreiben Quantenteilchen, die so genannte Farbladungen tragen und sich ähnlich wie die Quarks und Gluonen der normalen Teilchenphysik verhalten. Die im Innern geltenden Gesetze sind eine Form der Stringtheorie und enthalten – anders als die Oberflächenphysik – die Gravitationskraft, die im Rahmen der Quantenmechanik schwer zu beschreiben ist.

▷ berücksichtigt. Eine solche Theorie wäre der Schlüssel zur Vereinigung aller Naturkräfte. Sie könnte erklären, was in einem Schwarzen Loch vorgeht und was in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall geschah. Der holografische Ansatz umgeht gewisse unübersteigbare Hindernisse auf dem Weg zu einer solchen Theorie der Quantengravitation.

Unter Theoretikern gilt die Quantengravitation als Heiliger Gral der Naturforschung, denn die gesamte Physik gehorcht Quantengesetzen – nur die Schwerkraft noch nicht. Die Quantenbeschreibung ist zum Paradigma physikalischer Theorien geworden, und es ergibt keinen Sinn, für die Gravitation eine Ausnahme zu machen. Zunächst wurde die Quantenmechanik vor gut achtzig Jahren entwickelt, um das Verhalten von Teilchen und Kräften in atomaren und subatomaren Größenordnungen zu beschreiben, denn dort beherrschen Quanteneffekte das Geschehen. Quantenobjekte haben keine eindeutig definierten Orte und Geschwindigkeiten, sondern lassen sich als Wahrscheinlichkeitswellen interpretieren, deren Messung stets mit einer gewissen Unschärfe behaftet ist. In der Quantenwelt ist im Grunde alles im Fluss – sogar der »leere« Raum. Er ist erfüllt von virtuellen Teilchen, die immerfort entstehen und gleich wieder vergehen.

Hingegen ist die derzeit beste Beschreibung der Gravitation, die Allgemeine Relativitätstheorie, eine rein klassische, das heißt nicht quantenphysikalische Theorie. Gemäß Einsteins großem Werk krümmen Masse und Energie die Raumzeit, und diese Krümmung verbiegt die Bahnen von Teilchen gerade so, als würden sie sich in einem Gravitationsfeld bewegen. Die Allgemeine Relativität ist eine wundervolle Theorie, und viele ihrer Vorhersagen wurden mit großer Genauigkeit bestätigt.

Eine Heirat mit Hindernissen

In einer klassischen Theorie haben alle Objekte eindeutige Orte und Geschwindigkeiten – wie die Planeten auf ihrer Bahn um die Sonne. Man kann diese Orte und Geschwindigkeiten sowie die Massen der Objekte in die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie einsetzen, daraus die Krümmung der Raumzeit berechnen und daraus wiederum den Einfluss der Gravitation auf die Bahnen der Objekte. Außerdem ist die leere Raumzeit selbst bei genauester Betrachtung völlig glatt – eine fugenlose Arena, in der Materie und Energie kontinuierlich agieren können.

Dass Mikroobjekte wie Atome und Elektronen keine exakten Orte und Geschwindigkeiten haben, ist nicht das einzige Problem bei der Entwicklung einer Quantenversion der Allgemeinen Relativitätstheorie. Viel schlimmer ist, dass im noch viel kleineren Maßstab der so genannten Planck-Länge – 10^{-33} Zentimeter – die Raumzeit selbst als ein brodelnder Quantenschaum erscheint, ähnlich dem erwähnten Meer virtueller Teilchen, das den leeren Raum erfüllt. Hier versagen die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Wenn wir annehmen, dass die Materie den Gesetzen der Quantenmechanik gehorcht und die Gravitation den Gesetzen der Allgemeinen Relativitätstheorie, stoßen wir auf mathematische Widersprüche. Darum brauchen wir eine Quantentheorie der Gravitation.

In den meisten Fällen schaffen die widersprüchlichen Eigenschaften von Quantenmechanik und Allgemeiner Relativitätstheorie allerdings kein Problem: Meist machen entweder die Quanten- oder die Schwerkrafteffekte so wenig aus, dass sie sich vernachlässigen oder näherungsweise berechnen lassen. Erst bei extrem starker Krümmung der Raumzeit werden die Quanteneigenschaften der Gravitation bedeutsam. Das setzt allerdings eine sehr große oder sehr dichte Masse voraus. Selbst die Krümmung nahe der Sonne ist dafür viel zu klein.

Doch beim Urknall spielten diese Effekte eine wichtige Rolle. Deshalb brauchen wir eine Quantentheorie der Gravitation, um den Beginn des Universums beschreiben zu können. Außerdem ist die Theorie wichtig, um die Vorgänge im Zentrum Schwarzer Löcher zu verstehen, denn dort wird die Materie in ein Gebiet extremer Krümmung gequetscht. Da Gravitation Raumzeitkrümmung ist, wird jede Quantentheorie der Gravitation zugleich auch eine Theorie der Raumzeit sein; sie sollte erklären, woraus der erwähnte Raumzeitschaum eigentlich besteht und was die Raumzeit letztendlich wirklich ist.

Ein viel versprechender Ansatz dafür ist die Stringtheorie, die von Physikern seit den 1970er Jahren untersucht wird. Sie überwindet manche Hürden, die auf dem Weg zu einer widerspruchsfreien Quantengravitation liegen. Allerdings ist die Stringtheorie noch unfertig. Wir besitzen zwar einige Näherungsformeln für Strings, aber die exakten Gleichungen kennen wir nicht. Auch das Grundprinzip, das die Form der Gleichungen erklären würde, ist uns unbekannt, und es gibt unzählige physikalische Größen, die wir nicht aus den Gleichungen herleiten können.

In den letzten Jahren haben die Stringtheoretiker viele interessante und

überraschende Resultate erzielt, welche die Quantenraumzeit in neuem Licht erscheinen lassen (siehe »Die Landschaft der Stringtheorie« von Raphael Bousso und Joseph Polchinski, Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2005, S. 54). Daraus ergibt sich erstmals eine vollständige und widerspruchsfreie Quantenbeschreibung der Gravitation in so genannten negativ gekrümmten Raumzeiten. Auf solche Geometrien scheinen die holografischen Theorien zuzutreffen.

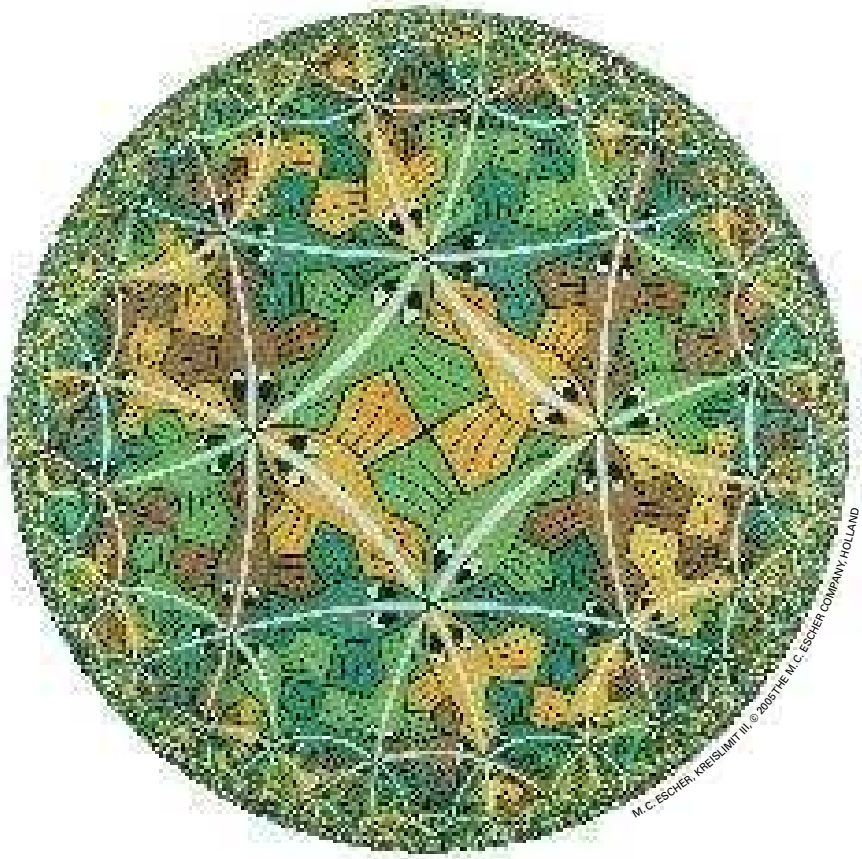
Wir alle sind mit der euklidischen Geometrie vertraut, in welcher der Raum flach, das heißt nicht gekrümmt ist. Das ist die Geometrie unserer Alltagswelt, in der wir die Krümmung der Erdoberfläche vernachlässigen: Parallele Gerade schneiden sich niemals, und auch alle anderen euklidischen Axiome gelten.

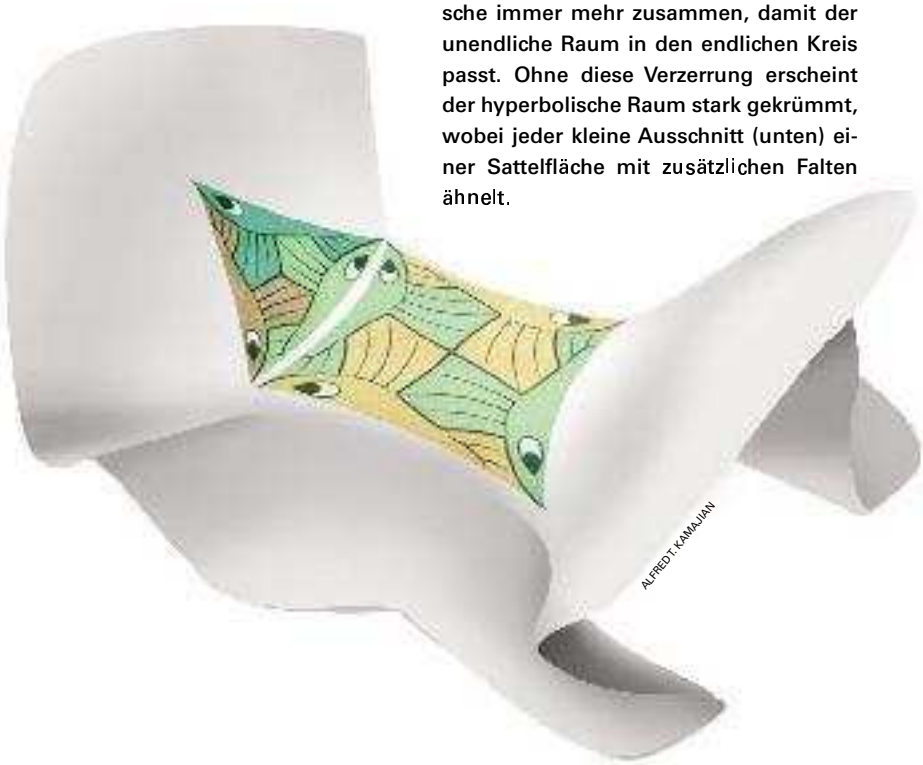
Wir kennen auch nichteuklidische Räume, die positiv oder negativ gekrümmt sein können. Das einfachste Beispiel für positive Krümmung ist die Oberfläche einer Kugel. Sie ist konstant positiv gekrümmt; das heißt, ihre Krümmung ist in jedem Punkt gleich groß – anders als etwa ein Ei, das an den Enden stärker gekrümmt ist.

Fische im hyperbolischen Aquarium

Das einfachste Beispiel für konstante negative Krümmung heißt hyperbolischer Raum. Er fasziniert seit Langem nicht nur Wissenschaftler. Der niederländische Künstler M.C. Escher hat immer wieder hyperbolische Räume veranschaulicht. Sein auf dieser Seite wiedergegebenes Bild ist die Projektion eines hyperbolischen Raums auf die Ebene. Die Fische schrumpfen zum Rand hin, weil der negativ gekrümmte Raum immer stärker gestaucht werden muss, damit er auf das flache Papier passt. Den umgekehrten Effekt sehen wir auf einer Weltkarte: Weil die Erde eine positiv gekrümmte Kugel ist, werden die Länder in Nähe der Pole gedehnt.

Wenn zusätzlich die Zeit ins Spiel kommt, entstehen Raumzeiten mit positiver oder negativer Krümmung. Die einfachste positiv gekrümmte Raumzeit heißt De-Sitter-Raum, nach dem niederländischen Physiker Willem de Sitter, der 1917 ein entsprechendes Weltmodell schuf. Nach Ansicht vieler Kosmologen glich das Universum zu Beginn einem De-Sitter-Raum. In ferner Zukunft könnte es sich durch die Beschleunigung ▷





Die Grafik von M.C. Escher (oben) zeigt die Projektion eines hyperbolischen Raums auf die Zeichenebene. Eigentlich ist jeder Fisch gleich groß, und der kreisförmige Rand liegt unendlich weit vom Zentrum der Scheibe entfernt. Die Projektion quetscht die äußeren Fische immer mehr zusammen, damit der unendliche Raum in den endlichen Kreis passt. Ohne diese Verzerrung erscheint der hyperbolische Raum stark gekrümmt, wobei jeder kleine Ausschnitt (unten) einer Sattelfläche mit zusätzlichen Falten ähnelt.

▷ der kosmischen Expansion wieder dieser Geometrie annähern.

Umgekehrt nennen wir die einfachste negativ gekrümmte Raumzeit Anti-De-Sitter-Raum. Er ähnelt dem hyperbolischen Raum zuzüglich einer zeitlichen Dimension. Im Gegensatz zu unserem expandierenden Universum kann ein Anti-De-Sitter-Raum weder expandieren noch kontrahieren – er sieht zu allen Zeiten gleich aus. Trotz dieses Unterschieds erweist sich der Anti-De-Sitter-Raum als sehr nützlich bei der Suche nach Quantentheorien für Raumzeit und Gravitation.

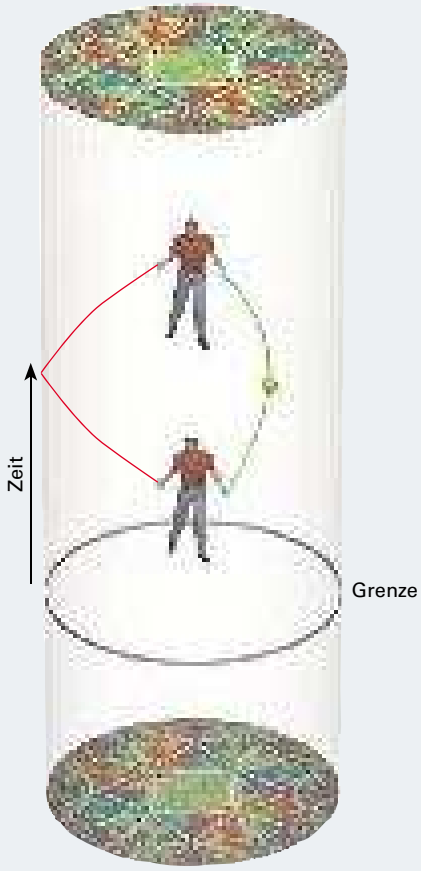
Wenn wir den hyperbolischen Raum wie in Eschers Grafik als Scheibe darstellen, dann gleicht die Anti-De-Sitter-Raumzeit einem Stapel dieser Scheiben, die einen Zylinder bilden (siehe dazu Kasten unten). Längs der Zylinderachse vergeht die Zeit. Ein hyperbolischer Raum kann mehr als zwei Dimensionen haben. Der Anti-De-Sitter-Raum, der unserer Raumzeit mit ihren drei räumlichen Dimensionen am meisten ähnelt, erzeugt eine dreidimensionale »Escher-Projektion« als Querschnitt seines vierdimensionalen Zylinders.

Die Physik im Anti-De-Sitter-Raum hat ein paar seltsame Eigenschaften. Wer irgendwo frei in einem solchen Raum schwebt, gewinnt den Eindruck, sich am Boden eines Gravitationspotenzials aufzuhalten: Jedes Objekt, das man fortschleudert, kehrt wie ein Bumerang zurück. Noch überraschender ist, dass die Zeit bis zur Rückkehr nicht von der Wucht des Wurfs abhängt. Das Objekt entfernt sich auf seiner Rundreise zwar desto weiter, je mehr Schwung man ihm gibt, aber die Rückkehrzeit bleibt stets dieselbe. Wenn man einen Lichtblitz aussendet, der aus Photonen mit der maximal möglichen Geschwindigkeit – der des Lichts – besteht, so entfernt er sich unendlich weit und kehrt dennoch in endlicher Zeit wieder zurück. Der Grund für dieses seltsame Phänomen ist eine Art Zeitkontraktion, die mit der Entfernung vom Beobachter zunimmt.

Obwohl der Anti-De-Sitter-Raum unendlich ist, hat er eine Grenze – allerdings im Unendlichen. Um diese Grenze zu ziehen, benutzen Physiker und Mathematiker einen verzerrten Maßstab, der wie in Eschers Bild einen unendlich großen Abstand in einen endlichen Rahmen quetscht. Die Grenze ähnelt dem Rand von Eschers Zeichnung oder der Oberfläche des erwähnten Zylinders. Im Zylinderbeispiel hat die Grenze zwei Dimensionen – eine räumliche um den Zylinder herum sowie die zeitliche in seiner Längsrichtung. Beim vierdimensionalen Anti-De-Sitter-Raum bekommt sie zwei Raumdimensionen und eine Zeitdimension. Während der Rand der Escher-Gra-

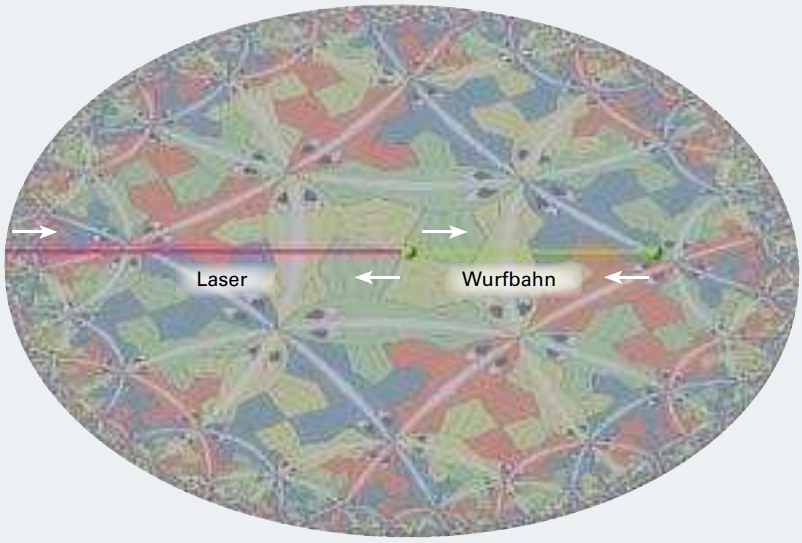
Eine seltsame Raumzeit mit negativer Krümmung

Die holografische Theorie setzt eine negativ gekrümmte Raumzeit voraus, den so genannten Anti-De-Sitter-Raum.



Anschaulich können wir uns einen Stapel hyperbolischer Scheiben vorstellen, wobei jede Scheibe den Zustand des Universums zu einem Zeitpunkt repräsentiert. Der zylindrische Stapel ist ein dreidimensionaler Anti-De-Sitter-Raum, mit der Längsachse als Zeitdimension. In einer solchen Raumzeit herrscht eine seltsame Physik. Ein mit beliebiger Wucht aus dem Zentrum geworfenes Objekt (grüne Bahn) kehrt stets nach derselben Zeit zurück. Genauso lange braucht ein Laserstrahl (rot) bis zum Rand des Universums und wieder zurück.

In der vierdimensionalen Version, die unserem Universum stärker ähnelt, bildet die Grenze zu jedem Zeitpunkt nicht einen Kreis, sondern eine Kugel.



ALFRED T. KAMAJIAN

fik einen Kreis bildet, ist die Grenze des vierdimensionalen Raums zu jedem Zeitpunkt eine Kugeloberfläche. Auf dieser Grenze liegt das Hologramm der holografischen Theorie.

Vereinfacht ausgedrückt geht es um folgende Idee: Eine Quantengravitationstheorie im Innern einer Anti-De-Sitter-Raumzeit ist vollständig äquivalent zu einer gewöhnlichen Quantenteilchentheorie, die auf dem Rand gilt. Wenn das zutrifft, können wir eine relativ gut beherrschbare Quantenteilchentheorie nutzen, um eine Quantengravitationstheorie zu definieren, über die wir praktisch gar nichts wissen.

Angenommen, wir besitzen zwei Kopien eines Films – eine auf einer Filmspule, eine auf einer DVD. Die beiden Formate sind völlig verschieden: Das erste ist ein Zelluloidstreifen mit Einzelbildern, auf denen wir mit bloßem Auge Filmszenen erkennen; das zweite ist eine zweidimensionale Scheibe mit Ringen magnetisierter Punkte, die – sofern wir sie überhaupt wahrnehmen könnten – eine Folge von Nullen und Einsen bilden. Und doch »beschreiben« beide Formate denselben Film.

Ebenso umfassen die beiden Theorien, obwohl scheinbar grundverschieden, dasselbe Universum. Die DVD sieht aus wie eine metallische Scheibe, die in allen Regenbogenfarben schillert. Die auf der Grenze gültige Theorie sieht aus wie eine Teilchentheorie ohne Gravitation. Die DVD liefert uns nur dann detaillierte Bilder, wenn wir die auf ihr gespeicherten Bits richtig verarbeiten. Aus der Grenz-Teilchentheorie ergeben sich die Quantengravitation und eine Extradimension, wenn wir die Gleichungen richtig interpretieren.

Was bedeutet es eigentlich, wenn zwei Theorien äquivalent sind? Erstens gibt es zu jedem Gebilde in der einen Theorie ein Gegenstück in der anderen. Die Theorien können dabei die Gebilde ganz unterschiedlich beschreiben. Einem bestimmten Teilchen im Innern könnte beispielsweise auf der Grenze eine ganze Ansammlung von andersartigen Teilchen entsprechen, die als einheitliches Gebilde betrachtet werden. Zweitens müssen die Vorhersagen für einander entsprechende Gebilde identisch sein. Wenn also im Innern zwei Teilchen mit einer Wahrscheinlichkeit von 40 Prozent kollidieren, müssen die beiden entsprechenden Teilchenansammlungen auf dem Rand ebenfalls mit 40 Prozent Wahrscheinlichkeit zusammenstoßen.

Um mehr ins Detail zu gehen: Die Teilchen auf dem Rand verhalten sich ganz ähnlich wie Quarks und Gluonen. Quarks sind die Bausteine, aus denen Protonen und Neutronen bestehen; Gluonen sind die Träger der starken Wechselwirkung, welche die Quarks aneinander bindet. Quarks tragen eine so genannte Farbladung, die drei verschiedene Werte oder »Farben« annehmen kann. Die darüber vermittelte Wechselwirkung zwischen den Quarks heißt Chromodynamik. Der Unterschied zwischen den Grenzteilchen und den gewöhnlichen Quarks und Gluonen ist, dass Erstere nicht nur drei, sondern zahlreiche Farben tragen können.

Gluonenketten am Rand unseres Universums

Gerard 't Hooft von der Universität Utrecht in den Niederlanden untersuchte solche Theorien schon 1974 und folgerte, dass die Gluonen Ketten bilden, die sich ganz ähnlich verhalten wie die Strings der Stringtheorie. Deren genaue Natur blieb zunächst unklar, doch 1981 erkannte Alexander M. Polyakov, der jetzt an der Princeton University (New Jersey) forscht, dass die Strings einen höherdimensionalen Raum besetzen als die Gluonen. Wie wir gleich sehen werden, ist dieser höherdimensionale Raum in unserer holografischen Theorie das Innere des Anti-De-Sitter-Raums.

Um zu verstehen, woher die zusätzliche Dimension stammt, betrachten wir zunächst einen Gluonstring auf der Grenze. Er hat eine Dicke, die davon abhängt, wie stark seine Gluonen im Raum verschmiert sind. Wenn die Physiker berechnen, wie die Strings auf der Grenze des Anti-De-Sitter-Raums miteinander wechselwirken, erhalten sie ein höchst seltsames Ergebnis: Zwei unterschiedlich dicke Strings beeinflussen einander kaum. Es ist, als wären die beiden Strings räumlich voneinander getrennt. Darum lässt sich die Dicke der Strings als eine neue Raumkoordinate interpretieren, die einen Abstand von der Grenze angibt.

Ein dünner String auf der Grenze verhält sich demnach wie ein String, der sich nahe der Grenze aufhält, ein dicker Grenzstring hingegen wie ein weit vom Rand entfernter (siehe Kasten auf der folgenden Seite). Diese zusätzliche Koordinate ist genau, was wir brauchen, ▷

WICHTIGE ONLINE-ADRESSEN

» **Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI**
Entwicklung, Konstruktion,
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

» **DOK –**
Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

» **F.u.G. Elektronik GmbH**
Hochgenaue Gleichspannungsversorgungen
Netzgeräte für Nieder- und Hochspannung
für alle Anwendungen in Forschung und Technik
www.fug-elektronik.de

» **Faszination Weltraum!**
Alles über Astronomie und Raumfahrt!
www.weltraum-versand.de

» **Foto-Scout-Zuse**
Die lernende Bildsuchmaschine der
besonderen Art zum Sichten, Sortieren und
Wiederfinden von Fotos auf Ihrem PC
www.foto-scout-zuse.com

» **Kernmechanik –**
Optimiertes Modell:
Kernspin + Dipolmomente
www.kernmechanik.de

» **Patentanwälte Charrier Rapp & Liebau**
Beratung und Vertretung in Patent-,
Muster- und Markenangelegenheiten,
Lizenzen und Patentrecherchen
www.charrier.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon 0211 61 88-579
E-Mail: m.grigo@vhb.de

▷ um Bewegungen in der vierdimensionalen Anti-De-Sitter-Raumzeit zu beschreiben. Einem Beobachter im Innern der Raumzeit erscheinen die unterschiedlich dicken Strings, die auf dem Rand sitzen, als gleichermaßen dünne Strings an unterschiedlichen radialen Orten. Die Anzahl der Farben auf der Grenze bestimmt die Größe des Innern, das heißt den Radius der Kugeloberfläche, die dem Rand des Escherbilds entspricht. Für eine Raumzeit, die so groß ist wie das sichtbare Universum, braucht die Theorie rund 10^{60} Farben.

Wie sich herausstellt, übernimmt eine bestimmte Art von Gluonketten in der vierdimensionalen Raumzeit die Rolle des Gravitons, des Quantenteilchens der Schwerkraft. In dieser Beschreibung erwächst die Gravitation in vier Dimensionen aus den Teilchenwechselwirkungen in einer dreidimensionalen Welt ohne Gravitation. Dass in der Theorie Gravitonen vorkommen, ist eigentlich keine Überraschung; seit 1974 wissen die Physiker, dass Stringtheorien stets zu Quantengravitation führen. Die aus Gluonen gebildeten Strings sind da keine Ausnahme, doch die Schwerkraft wirkt nun erst in dem höherdimensionalen Raum.

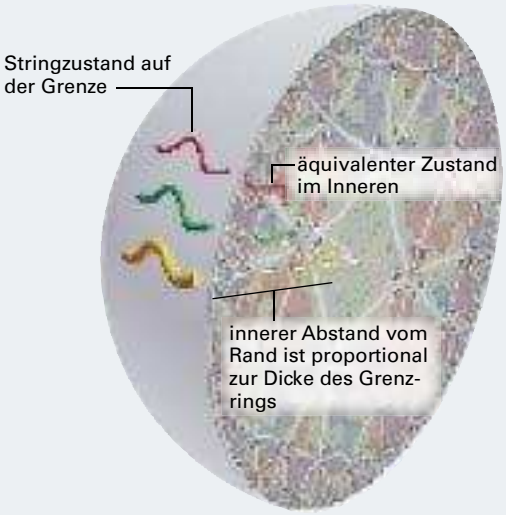
Somit ist die holografische Äquivalenz nicht etwa bloß eine wilde Spekulation. Vielmehr verknüpft sie auf fundamentale Weise die Stringtheorie – den am besten untersuchten Weg zur Quantengravitation – mit Theorien für Quarks und Gluonen, auf denen die Teilchenphysik aufbaut. Überdies scheint die holografische Theorie erste Erkenntnisse über die bislang unbekannten exakten Gleichungen der Stringtheorie zu liefern.

Eigentlich hatten die Physiker die Stringtheorie bereits in den späten 1960er Jahren erfunden, um die starke Wechselwirkung zu beschreiben, doch dieser Versuch wurde später zu Gunsten der Chromodynamik aufgeben. Der holografische Zusammenhang zwischen Stringtheorie und Chromodynamik zeigt nun, dass der frühere Versuch kein Irrweg war: Die beiden Beschreibungen sind zwei Seiten derselben Medaille.

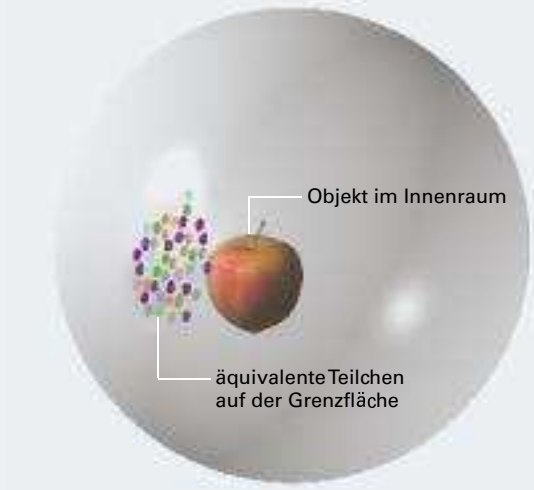
Variiert man die Grenz-Chromodynamik, indem man Details der Wechselwirkung zwischen den Grenzteilchen verändert, so entsteht ein ganzes Sortiment von inneren Theorien. Diese Theorien können entweder nur Gravitationskräfte enthalten oder Gravitation plus Elektromagnetismus – und so weiter. Leider kennen wir bislang keine Grenztheorie, die eine Innentheorie mit exakt den vier Naturkräften liefert, die in unserem Universum herrschen.

Wie eine Extradimension entsteht

Nach der holografischen Theorie sind Quarks und Gluonen, die auf der Grenze eines Anti-De-Sitter-Raums agieren, den andersartigen Teilchen im höherdimensionalen Innern des Raums äquivalent.



Die Quarks und Gluonen auf der kugelförmigen Grenze des Anti-De-Sitter-Raums verbinden sich zu unterschiedlich dicken Strings. Der holografischen Interpretation zufolge entsprechen diesen Strings andere Elementarteilchen im Innern, die ebenfalls Strings sind. Deren Abstand von der Grenze wächst umso mehr, je dicker die Grenzstrings werden.



Auf diese Weise können Wolken von Quarks und Gluonen auf der Grenzfläche äquivalente komplexe Objekte im Innern beschreiben – beispielsweise einen Apfel. Diese holografische Äquivalenz hat den Vorteil, dass die inneren Objekte der Schwerkraft unterliegen, obwohl auf der Grenzfläche keine eigene Gravitation existiert.

ALFREDT. KAMAJIAN

Eine erste vierdimensionale Grenz-Raumzeit

1997 äußerte ich die Vermutung, die holografische Korrespondenz gelte für eine bestimmte Theorie – eine vereinfachte Chromodynamik in einer vierdimensionalen Grenz-Raumzeit. Dies stieß bei den Stringtheoretikern sofort auf großes Interesse. Polyakov, Stephen S. Gubser und Igor R. Klebanov von der Princeton University sowie Edward Witten vom Institute for Advanced Study in Princeton präzisierten die Vermutung. Seither haben viele Physiker den Ansatz auf andere Dimensionen und chromodynamische Theorien verallgemeinert. Die Resultate sprechen zwar für den holografischen Ansatz, aber bislang wurde kein einziges Beispiel exakt bewiesen – die Mathematik ist zu kompliziert.

Vermag die holografische Beschreibung der Schwerkraft gewisse Eigenschaften Schwarzer Löcher zu erklären? Wie Stephen W. Hawking von der Universität Cambridge herausfand, emittieren Schwarze Löcher eine schwache

Strahlung. Dieser Hawking-Strahlung entspricht eine bestimmte Temperatur. Bei einem üblichen physikalischen System – sei es ein Glas Wasser oder die Sonne – beschreibt die Thermodynamik die Temperatur als statistische Bewegung der mikroskopischen Bestandteile. Aber welche Temperatur hat ein Schwarzes Loch? Dafür müssten wir wissen, aus welchen mikroskopischen Komponenten ein Schwarzes Loch besteht und wie sie sich verhalten. Darüber kann nur eine Theorie der Quantengravitation Auskunft geben.

Einige Aspekte der Thermodynamik Schwarzer Löcher weckten Zweifel, ob es überhaupt eine quantenmechanische Theorie der Schwerkraft geben könne. Es schien, als müsste angesichts der Effekte in Schwarzen Löchern sogar die Quantenmechanik versagen. Zumindest für ein Schwarzes Loch in einer Anti-De-Sitter-Raumzeit wissen wir nun dank der holografischen Theorie, dass die Quantenmechanik intakt bleibt. Ein solches Schwarzes Loch entspricht einer Konfiguration von Teilchen auf der Grenze. Da diese Grenzteilchen in großer Zahl umherschwirren, können die Theoretiker nach den üblichen Regeln der Thermodynamik die Temperatur berechnen. Dabei kommt derselbe Wert heraus, den Hawking auf ganz andere Weise berechnete – ein höchst erfreuliches Resultat. Vor allem gehorcht die Grenztheorie den gewöhnlichen Regeln der Quantenmechanik, ohne dass ein Widerspruch auftritt.

Physiker haben die holografische Beziehung inzwischen auch in umgekehrter Richtung angewendet: Aus bekannten Eigenschaften Schwarzer Löcher in der inneren Raumzeit schlossen sie auf das Verhalten von Quarks und Gluonen auf der Grenze bei sehr hohen Temperaturen. Dam Son von der University of Washington und seine Mitarbeiter untersuchten die so genannte Scherungsviskosität; sie ist für dünnflüssige Substanzen klein und für zähe groß. Wie sich herausstellte, haben Schwarze Löcher eine extrem geringe Scherungsviskosität – kleiner als jede bekannte Flüssigkeit. Auf Grund der holografischen Äquivalenz muss das Gleiche auch für Quarks und Gluonen bei sehr hohen Temperaturen gelten.

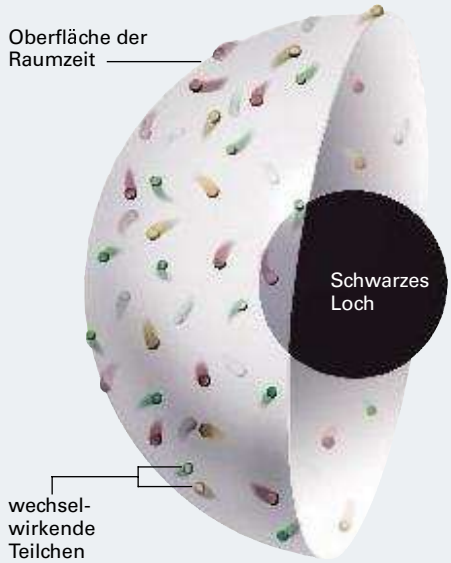
Ein Indiz dafür, dass diese Vorhersage zutrifft, liefert der Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) des Brookhaven National Laboratory auf Long Island. In diesem Beschleuniger prallen Gold-Atomkerne mit sehr hoher Energie zusammen. Nach einer vorläufigen Analyse der Experimente erzeugen die Kollisionen eine Quark-Gluon-»Flüssigkeit« mit sehr niedriger Viskosität. Obwohl Sons Team eine vereinfachte Version der Chromodynamik benutzte, scheint seine Berechnung einen realen Kern zu haben. Bedeutet das, der RHIC erzeuge kleine fünfdimensionale Schwarze Löcher? Für eine Antwort ist es aus experimentellen und theoretischen Gründen noch zu früh. Jedenfalls wären diese winzigen Schwarzen Löcher nicht gefährlich: Sie verdampfen fast so schnell wie sie entstehen, und sie existieren in fünf Dimensionen, nicht in unserer vierdimensionalen Welt (siehe »Schwarze Löcher im Labor« von Bernard J. Carr und Steven B. Giddings, Spektrum der Wissenschaft 9/2005, S. 32).

Viele Fragen zur holografischen Theorie bleiben offen. Insbesondere: Ähnelt unser Universum überhaupt in irgendeiner Hinsicht der Anti-De-Sitter-Raumzeit? Für den Anti-De-Sitter-Raum ist entscheidend, dass er eine Grenze mit wohldefinierter Zeit hat. Dieser Rand hat ewig existiert und wird ewig fortbestehen. Unser expandierendes Universum, das aus einem Urknall hervorgegangen ist, hat keine derartige Grenze. Deshalb bleibt vorläufig unklar, wie wir eine holografische Theorie für unser Universum definieren sollen; es gibt für das Hologramm keinen geeigneten Platz.

Dennoch lässt sich aus dem holografischen Modell eine wichtige Lehre ziehen: Die Quantengravitation, über die sich die besten Theoretiker der Welt seit Jahrzehnten die Köpfe zerbrechen, kann sehr einfach werden, wenn man die richtigen Variablen wählt. Vielleicht gelangen wir auf dem holografischen Umweg schon bald zu einer simplen Beschreibung des Urknalls. ◁

Eine Lösung für das Rätsel Schwarzer Löcher

Der Physiker Stephen W. Hawking zeigte in den 1970er Jahren, dass Schwarze Löcher eine Temperatur haben und Strahlung emittieren. Dadurch entsteht ein physikalisches Rätsel: Temperatur ist eine Eigenschaft großer Teilchenensembles – aber durch welche Partikelgesamtheit wird ein Schwarzes Loch definiert? Die holografische Theorie löst das Rätsel, indem sie postuliert, dass das Schwarze Loch einem Schwarm wechselwirkender Teilchen auf der Grenzfläche der Raumzeit äquivalent ist.



ALFRED T. KAMAJIAN

Juan Maldacena ist Professor für Naturwissenschaft am Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey). Zuvor gehörte er von 1997 bis 2001 dem Physics Department der Harvard University an. Gegenwärtig untersucht er verschiedene Aspekte der holografischen Theorie.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Das elegante Universum. Von Brian Greene. Berliner Taschenbuch Verlag, 2004

Strings – Urbausteine der Natur? Von Pierre Ramond. Spektrum der Wissenschaft 2/2003, S. 24

Anti-de Sitter space and holography. Von Edward Witten in: Advances in Theoretical and Mathematical Physics, Bd. 2. S. 253, 1998

Gauge theory correlators from non-critical string theory. Von S. Gubser, I. R. Klebanov und A. M. Polyakov in: Applied Physics Letters B, Bd. 428, S. 105, 1998

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die letzten wilden Pferde

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Ihre Blütezeit haben die Pferde – die Equiden – lange hinter sich. Heute sind sogar ihre wenigen überlebenden Arten selten geworden. Schutzprogramme bemühen sich um sie.

Von Patricia D. Moehlman

Schönheit, Kraft, Anmut und Schnelligkeit der Pferde fesselten die Menschen schon, als sie zum ersten Mal Bilder von ihnen auf Höhlenwände malten. Vor 30 000 Jahren grasten sie noch in großer Zahl in Europa. Heute leben hier keine wilden Pferde mehr. Und von den vielen Arten, die früher in Asien, Amerika und Afrika vorkamen, existieren gerade noch sieben, zumeist in geringer Individuenzahl und vom Aussterben bedroht: drei Zebra- und drei Eselarten sowie das Przewalski- oder Urwildpferd, das im Freiland bereits ausgestorben war und in den letzten Jahren in der Mongolei wieder ausgewildert wurde (siehe Kasten S. 50/51). Dabei gehörten die Angehörigen der Equiden, der Familie der Pferde, einmal zu den häufigsten und wichtigsten großen Pflanzenfressern dieser Erdteile.

Das Anliegen der Wildbiologen, zumindest die wenigen noch vorhandenen Bestände dieser Einhufer zu erhalten, geht einher mit dem Wunsch, die Lebensweise der einst ökologisch so wichtigen Tiergruppe möglichst gründlich zu erforschen. Die gleichen Ziele hat sich auch das von mir geleitete Wildpferd-Spezialisten-Team vom Internationalen Naturschutzverband IUCN gesetzt. (Die Abkürzung steht für »International Union for Conservation of Nature and Natural Resources«.) Wir haben einen Plan für die dringendsten Schutzmaßnahmen aufgestellt.

Zu den renommiertesten Wissenschaftlern, die Equiden im Freiland beobachtet und ihr natürliches soziales Verhalten erforscht haben, gehört der Ethologe Hans Klingel von der Universität Braunschweig. Unter anderem entdeckte er, dass die sozialen Beziehungsmuster bei den einzelnen Pferdearten nicht einheitlich sind, obwohl alle gesellig zu leben vermögen. Denn bei ihnen treten zwei klar unterschiedliche Formen der sozialen Organisation auf, wie Verhaltensforscher sagen. Interessanterweise besteht dabei eine Verbindung zu ökologischen Faktoren.

Zwar leben alle Pferdearten in offenem Gelände, denn sie sind Grasfresser und somit auch an das Leben auf weiten freien Flächen angepasst. Allerdings reicht das Spektrum ihrer Habitate von ziemlich trockenen, beinahe wüstenartigen Gebieten bis zu grasbewachsenen Savannen, wo es einigermaßen regelmäßig regnet. Von Angebot und Qualität an Weideflächen und Tränken hängt es ab, wie sich die Tiere miteinander arrangieren – ob sie zum Beispiel allein Futter suchen, ob sie sich zur Paarung zurückziehen und ob sie ihre Fohlen allein aufziehen oder nicht.

Zum einen gibt es Lebensräume, wo für Pferdearten kaum Mangel herrscht.

PATRICIA D. MOEHLMAN

Afrikanische Wildesel sind extrem selten geworden. Seit zwanzig Jahren beobachtet die Autorin einige von ihnen in einem der letzten Rückzugsgebiete in Eritrea. Sie erkennt jedes Tier, wie diese beiden jungen Hengste, an der Zeichnung der Beine.

In einem Grasgebiet wie der Serengeti in Tansania etwa finden die Einhufer Nahrung und Wasser im Überfluss. Mehrere Stuten mit ihren Fohlen können dort nah zusammen weiden und somit in dauerhafter Gemeinschaft leben. Auch vermag ein einzelner Hengst die kleine Gruppe zu überwachen und gegen Rivalen abzuschirmen. Er allein paart sich mit den Stuten seiner »Familie«, seines »Harems«, wie die Ethologen sagen. In dieser Sozialstruktur leben im Allgemeinen das Steppen- und das Bergzebra sowie verwilderte Hauspferde. (Die Hauspferde, also domestizierte Tiere, stammen von verschiedenen Populationen einer eurasischen Wildpferdart ab.)

Völlig andere Voraussetzungen herrschen für Equiden in ariden Gegenden wie der Danakil-Wüste von Eritrea und Äthiopien nahe am südlichen Roten Meer. Wegen des geringen Futterangebots und der spärlichen Wasserstellen fänden die Stuten dort meist nicht genug Futter und Wasser, wenn sie miteinander grasen oder zur Tränke ziehen würden. So bleiben sie eher für sich und bilden auch keinen festen sozialen Verband. Aber die Hengste beanspruchen Reviere: Meist handelt es sich um einen Bereich nahe bei einer wichtigen Futter- oder Wasserstelle, den ein einzelner Hengst als »sein Territorium« bewacht. Dabei passt er vor allem auf, dass durchziehende rossige Stuten nur von ihm besprungen werden. Die Esel, darunter auch der asiatische Halbesel, sowie das Grevy-Zebra trifft man in dieser Sozialstruktur an, ebenso verwilderte ▷

▷ domestizierte Esel. (Die Hausesel stammen vom afrikanischen Wildesel ab).

Diese beiden grundverschiedenen Lebensformen wirken sich auf vieles aus. Grundsätzlich bietet ein Harem den Fohlen und ihren Müttern einigen Schutz vor Angriffen etwa von Wölfen, Löwen oder Hyänen. Auch werden die Stuten vergleichsweise selten von Junggesellen, jungen ungebundenen Hengsten, belästigt. Es kann für die Stute mit einer Fehlgeburt oder dem Tod eines Fohlens enden, wenn ein Hengst sie unablässig treibt und zu besteigen versucht und dadurch am Fressen hindert.

Haremsregeln

Zu einem Harem können bis zu sechs erwachsene Stuten gehören. Manchmal besteht er aber auch nur aus dem Hengst und einer Stute mit Fohlen. Die erwachsenen Stuten bleiben oft ihr Leben lang zusammen. Hingegen wechselt der Haremshengst mitunter, sofern ein anderer die Position zu erobern vermag, indem er einen schon altersschwachen oder durch Kämpfe erschöpften Hengst vertreibt. Überzählige – besonders die jüngeren – Hengste formieren sich zu so genannten Junggesellengruppen. Jungstuten verlassen den Harem in der Regel mit zwei oder drei Jahren. Gewöhnlich wirbt sie ein anderer Hengst ab, wenn sie das erste Mal rossig sind. Die Junghengste bleiben meist einige Jahre länger in der Geburtsgruppe, bis sie sich einer Junggesellengruppe anschließen.

Bei der Lebensform ohne dauerhafte Gruppenbindung bleiben erwachsene Tiere zwar manchmal vorübergehend als Gruppe beieinander, haben aber keine festen Beziehungen. Die Stuten halten nur mit ihrem jüngsten oder den letzten beiden Fohlen fest zusammen. Jedoch beherrscht derselbe Hengst ein Revier nahe einer guten Ressource unter Umständen jahrelang. Er duldet darin durchaus andere Hengste – neben Stuten –, solange die nicht versuchen, ihm das alleinige Paarungsrecht streitig zu machen.

Bei dieser sozialen Organisationsform geht es entscheidend um den Wasserzugang. Mindestens einmal am Tag muss eine Stute, die ein Fohlen säugt, trinken können. Sie hält sich deshalb auch möglichst in der Nähe einer Tränke auf. Der Hengst, der sein Revier bei dieser Ressource hat, kann sich mit ihr paaren, wenn sie ein oder zwei Wochen nach der Geburt wieder empfängnisbereit ist, oder auch bei der nächsten Gelegenheit einige Wochen später. Die Stuten ihrerseits erhalten von ihm Schutz vor anderen Hengsten und vor Raubtieren.

In beiden Organisationsformen bringen die Weibchen ihr erstes Fohlen gewöhnlich erst mit vier oder fünf Jahren zur Welt und fohlen dann nur etwa jedes zweite Jahr, obwohl wir von Tieren in Gefangenschaft wissen, dass sie biologisch gesehen früher und auch jährlich Nachwuchs haben könnten. Offenbar hindern sie daran aber äußere Zwänge, vor allem die Mühsal, Nahrung und Wasser zu beschaffen. Ihr an sich schon nicht großes Fortpflanzungspotenzial nutzen wilde Pferde unter natürlichen Bedingungen also bei Weitem nicht aus.

Die Equiden gehören zu den Säugergruppen mit nur wenigen, aber lange und aufwändig betreuten Jungen. Die Fohlen erhalten nicht nur Milch, sondern dürfen mit der Mutter auch Futter- und Wasserstellen teilen. Und solange sie unselbstständig sind, genießen sie deren Beistand gegen Raubfeinde. Über viele Jahrtausende haben die Equiden von dieser Strategie profitiert.

Doch die Verhaltensanpassung muss scheitern, wenn die Population aus welchen Gründen auch immer einer hohen Todesrate ausgesetzt ist. An der heutigen Bedrohung der Pferde trägt weit gehend der Mensch Schuld, weil er sie zu stark bejagt oder ihnen zu viel Lebensraum nimmt. Zum einen nutzt oder verkauft er das Fleisch und das Fell, verwertet aber auch die Tiere, unter anderem die Knochen, zum Beispiel für Arzneien und stärkende Präparate für sich und sein Vieh. Zum anderen verdrängt er die Wildpferdarten zunehmend von den besten Weideflächen und Wasserstellen. Viele Stuten verlieren ihre Fohlen, weil der Weg zur nächsten Tränke zu weit ist. Wenn eine Population erst einmal abgenommen hat, setzen ihr Krankheiten oder ungünstige Witterung umso heftiger zu. Ein geografisch isolierter Bestand kann dann leicht völlig verschwinden.

Der gegenwärtige Rückgang der Individuenzahlen macht auch uns Freilandforschern die Arbeit im Gelände nicht leicht. Wollen wir nämlich aufzeigen, ob und wie stark eine Art in einem Gebiet bedroht ist, müssen wir die letzten Tiere erst einmal aufspüren. Bei so niedrigen Populationsdichten eignen sich die sonst üblichen statistischen Zählverfahren anhand von Stichproben nicht mehr. Viele Equiden leben zudem in für Menschen besonders schwer zugänglichen und extrem unwirtlichen Gegenden, die man mit dem Auto nicht erreicht. Davon vermittelt mein Studienprojekt über afrikanische Wildesel einen Eindruck.

Auf der Fährte der letzten Wildesel

Die Danakil-Salzwüste, in Ostafrika im Afar-Dreieck nahe dem Roten Meer gelegen, wirkt in ihrer Ödnis und Rauheit alles andere als einladend. Selbst für eine Wüste ist sie ungewöhnlich trocken. Wenn in einem Jahr an die hundert Millimeter Niederschlag fällt, ist das viel. Nur im Schutz der engen Täler, die sich in die Berge und zerklüfteten Lavafelder schneiden, gedeihen überhaupt ein paar Gräser und Sträucher.

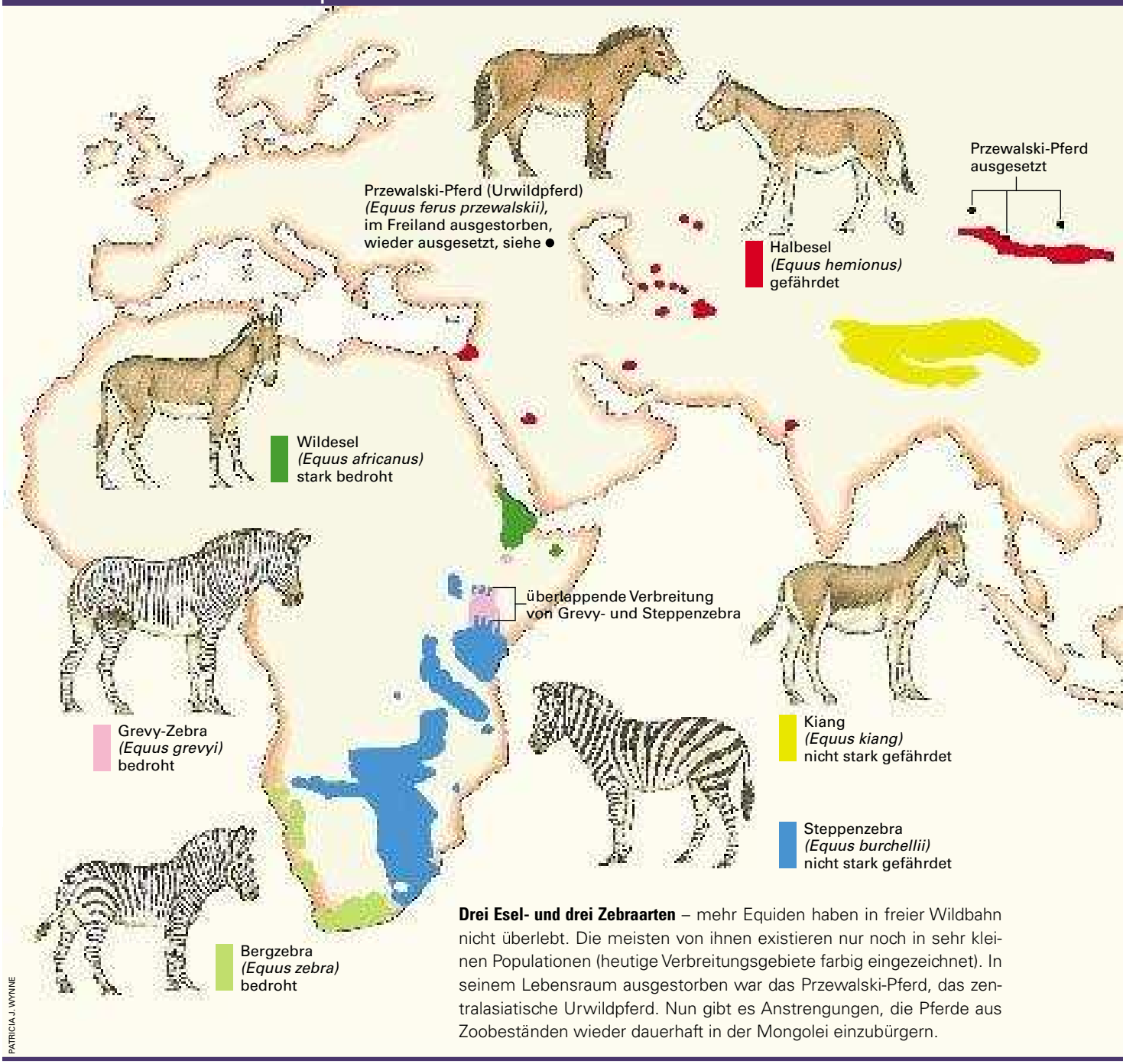
Trotzdem leben dort afrikanische Wildesel, fast die letzten der Art. Den Wunsch, die Vorfahren der Hausesel in den Wüstengebirgen Afrikas in freier Natur zu beobachten, hegte ich seit meinen Studien an den verwilderten Eseln im Death Valley (»Tal des Todes«) in Kalifornien in den 1970er Jahren. Der letzte Bericht, dass jemand in der Danakil-Wüste Wildesel gesehen hatte, war allerdings zwanzig Jahre her, als ich 1994 dorthin kam. Es war völlig unsicher, ob

IN KÜRZE

▶ Die **Equiden** (die Familie der Pferde) gehörten einmal in der Alten und Neuen Welt zu den häufigsten großen Pflanzenfressern. Heute leben von ihnen in freier Wildbahn **nur noch sechs Arten** – außer dem Urwildpferd, dessen Wiedereinbürgerung derzeit in der Mongolei mühsam versucht wird. Sie sind fast alle **vom Aussterben bedroht**, zumal sie sich nur langsam fortpflanzen und Menschen sie oft zum Lebensunterhalt töten oder ihren Lebensraum einschränken.

▶ Bei **Schutzprogrammen** kommt es darauf an, die Interessen der Menschen mit den Belangen der Tiere zu vereinbaren. Darüber weiß die Forschung aber noch immer viel zu wenig.

Noch ist es nicht zu spät



PATRICIA J. WYNNE

Drei Esel- und drei Zebraarten – mehr Equiden haben in freier Wildbahn nicht überlebt. Die meisten von ihnen existieren nur noch in sehr kleinen Populationen (heutige Verbreitungsgebiete farbig eingezeichnet). In seinem Lebensraum ausgestorben war das Przewalski-Pferd, das zentralasiatische Urwildpferd. Nun gibt es Anstrengungen, die Pferde aus Zoobeständen wieder dauerhaft in der Mongolei einzubürgern.

es hier überhaupt noch welche von ihnen gab – und wenn, ob sie in dem schwierigen Gelände jemals zu finden sein würden.

In diesem Projekt arbeitete ich mit Experten der örtlichen Naturschutzvereinigungen zusammen: mit Fanuel Kebede von der äthiopischen und Hagos Yohannes von der eritreischen Organisation. Wie wir bald erfuhren, wussten die dortigen Viehhirten, dass im Danakil-Gebiet noch einige Wildesel vorkamen – und auch, wo man sie fand. In Eritrea führte uns Omar vom Hirtenvolk der Afar. Tagelang mussten wir meilenweit durch die heiße, trockene Vulkanlandschaft wandern, bis wir eines Morgens das Messir-Plateau erstiegen, eine zerklüftete Basaltlandschaft. Omar wusste dort eine Stelle, wo Afar-Hirten ihre Tiere weideten. Und nicht weit von den Schafen und Ziegen sahen wir die ersten Wildesel: eine Stute mit ihrem Fohlen und einen Hengst.

Unsere Langzeitfreilandstudie über die Wildesel dieser Wüste konnte beginnen, und wir werden sie auch in Zukunft weiterführen. Auf dem Messir-Plateau spürten wir bis heute mindestens 45 der seltenen, scheuen Tiere auf – sie lassen sich am Streifenmuster an den Beinen gut individuell unterscheiden (siehe Bild S. 44/45). Dass diese Art dort noch in vergleichsweise großer Dichte vorkommt, ist vor allem den Afar zu verdanken, die ihr Land und dessen Ressourcen seit je- ▷

In Eritrea wächst die Zahl der Wildesel langsam wieder – dank Regierungshilfe und dem Verhalten der Afar-Hirten. Auf den kargen, heißen Lavafeldern der Danakil-Wüste finden sie genügend Nahrung und Wasser.

▷ her mit denWildtieren teilen und sie ansonsten weit gehend in Ruhe lassen.

Sobald die Afar verstanden hatten, was meine Kollegen und ich hier wollten, halfen sie uns. Kommen wir heute zu einer neuen Kampagne in ihr Dorf, besorgen sie uns gleich drei Kamele, um unsere Ausrüstung in die Berge tragen zu lassen. Gemeinsam wandern wir dann auf das Plateau, wo wir unser Zeltlager errichten. Später bringt uns jeden zweiten Tag ein Mann mit seinem Kamel vier große Kanister Wasser. Solche Hilfe machte diese Feldstudie, bei der wir auf den Komfort eines Fahrzeugs verzichten müssen, überhaupt erst möglich. Dank der Afar können wir seit zwanzig Jahren Wildesel mitten in ihrem heutigen Verbreitungsgebiet beobachten.

Wir müssen uns freuen, dass wir überhaupt noch einige von diesen selten gewordenen Tieren antrafen. Nach den Zählungen und Schätzungen aller Wildeselvorkommen, die in den letzten zwanzig Jahren stattfanden, scheint die Gesamtindividuenzahl in dieser Zeit um 90 Prozent geschrumpft zu sein. Außerhalb von Eritrea, in Somalia und Äthiopien, existieren inzwischen allenfalls noch ein paar Hand voll der Tiere. Insgesamt gibt es in Freiheit wohl keine tausend Wildesel mehr. Die meisten leben in der Danakil-Wüste. Darum wurde die Art von der IUCN als stark vom Aussterben bedroht eingestuft.

An den uns seit vielen Jahren individuell bekannten Eseln auf dem Messir-Plateau beobachten wir unter anderem Raumnutzung und Wanderungen, den sozialen Umgang, die Fortpflanzung und einzelne Lebensgeschichten. Wir registrieren paarungsbereite und trächtige Stuten und notieren das Schicksal der Fohlen. Soweit sich bisher sagen lässt, verhalten sich die Wildesel ähnlich wie andere Equiden aus Wüstengebieten: Die Hengste beanspruchen Paarungsreviere, und einzig die Stuten mit ihren Fohlen bilden eine feste soziale Einheit. Hin und wieder sieht man die Esel auch in kleinen Gruppen mit bis zu vier erwachsenen Individuen, doch bleiben sie stets nur kurz beisammen, und es scheint nicht so besonders wichtig zu sein, wer alles dazugehört. Mal handelt es sich nur um erwachsene Individuen, mal um Tiere aller Altersstufen; bald sind es reine Weibchen-,

FOTOS DIESER DOPPELSEITE: PATRICIA D. MOEHLMAN

Der Kiang lebt in den Hochgebirgssteppen Tibets – in größerer Höhe als die anderen Wildpferde.

Beim Grevy-Zebra, einer vom Aussterben bedrohten Art, die in trockenen Habitaten im Norden Kenias und in Äthiopien lebt, bilden Muttertier und Fohlen die einzige stabile soziale Gemeinschaft.

bald reine Hengstgruppen, dann wieder Zusammenschlüsse beider Geschlechter. Es kommt allerdings auch vor, dass sich mehrere trächtige Stuten oder Mütter mit gleich alten Fohlen eine Zeit lang zusammenschließen. Immer aber scheint das spärlich und weit verteilt wachsende Futter jeden längeren Zusammenschluss unmöglich zu machen.

Sobald die Hengstfohlen zwei bis drei Jahre alt sind, bekommen wir sie in unserem Untersuchungsgebiet nicht mehr zu Gesicht. Wir vermuten, dass sie dann fortwandern, was sicherlich auch der Inzucht entgegenwirkt. Die jungen Stuten bleiben dagegen normalerweise bei der Mutter, bis sie ihr erstes Fohlen bekommen.

Über das Fortpflanzungsschema wissen wir noch recht wenig. Offenbar werfen die Stuten der Messir-Hochebene das erste Mal frühestens in einem Alter von fünf oder sechs Jahren, also auffallend spät. Bei extremen Trockenphasen lässt das erste Fohlen sogar noch länger auf sich warten. Die Stuten gebären meist alle zwei Jahre, doch kommen bei besonderer Futterknappheit deutlich weniger Fohlen zur Welt als sonst, von denen auch nur die wenigsten überleben. Sieht man diese Zahlen, versteht man, wieso die Wildeselbestände so stark zurückgegangen sind. Den Verlust vieler erwachsener Mitglieder – sei es wegen Nahrungsmangel, Wasserknappheit oder Bejagung – kann eine Population folglich durch Geburten, wenn überhaupt, nur schwer wettmachen.

Wie sehr die Fortpflanzung vom Niederschlag abhängt, zeigten die Jahre 1997 und 1998 eindrucksvoll. In der extremen Trockenperiode von 1997 hatte keine der Stuten des Messir-Plateaus Nachwuchs. Im folgenden Jahr, das wegen eines El Niño reichlich Regen brachte, fohlten alle Stuten, und von den Jungtieren überlebten mindestens 80 Prozent. Demnach scheint das Messir-Plateau für Wildesel heute noch Bedingungen zu bieten, unter denen sie ihr Fortpflanzungspotenzial immer wieder einmal ausschöpfen können. Tatsächlich herrscht dort mit rund 50 Eseln auf 100 Quadratkilometern die höchste von Forschern für die Art je erfasste Bestandsdichte. Sorglos darf man ihrem Schicksal auf der Hochebene dennoch nicht entgegensehen – dafür sind regenreichere Jahre dort viel zu selten. Und ob ein kleines Vorkommen von einigen Dutzend Tieren die Art insgesamt retten könnte, ist zu bezweifeln.

Zebras am Rand der Existenz

Ebenfalls vom Aussterben bedroht ist das Grevy-Zebra. Von dieser Pferdeart mit dem wegen der engen Streifung besonders beliebten Fell existieren vielleicht noch etwas über 3000 Individuen, zumeist in Nordkenia und ganz im Süden Äthiopiens. Außerdem leben diese Zebras in einer eher trockenen, recht kargen Umwelt. Wohl nicht zufällig ähnelt ihre Sozialstruktur der von afrikanischen Wildeseln, mit Paarungsterritorien der Hengste, wobei nur Stuten mit ihren Fohlen feste Gruppen bilden.

Dagegen sind die Steppenzebras noch recht zahlreich. Auch ihre Verbreitung hat zwar abgenommen, doch sie haben immer noch im östlichen und südöstlichen Teil Afrikas, von Kenia bis Südafrika, größere Populationen. Ihr Lebensraum – mit vergleichsweise mehr Niederschlag – sind die grasreichen, nahrhaften Steppen und Savannen, in denen sie in Harems aus einem Hengst und bis zu sechs Stuten und deren Fohlen oder in Junggesellenverbänden umherziehen. Dass Steppenzebras nun die häufigste Pferdeart darstellen, verdanken sie allerdings nicht zuletzt Naturschutzprogrammen, die sich darum bemühen, die Habitate zu erhalten und die Zebrajagd einzuschränken.

Aus diesem Artenvergleich folgt jedoch keineswegs, dass in Harems lebende Equiden die besseren Überlebensaussichten haben. Ein Gegenbeispiel ist das Przewalski- oder Urwildpferd aus Innerasien, das stark zur Haremsbildung neigt – wie verwilderte Hauspferde ja auch. Die Art ist in der Wildnis Mitte des 20. Jahrhunderts ausgestorben, besser gesagt ausgerottet worden. Mühsam werden jetzt einige der wenigen vorhandenen Zootiere in der Mongolei und den angrenzenden Ländern ausgewildert (siehe Kasten S. 50/51). Ob sich je wieder stabile Populationen etablieren werden, ist aber keineswegs gewiss. ▷

▷ Nicht so sehr die soziale Organisationsform als vielmehr Eingriffe von Seiten des Menschen, wie der Verlust von Lebensraum und Bejagung, bedeuten heute die eigentliche Gefahr für die letzten Pferde. Unser Spezialistenteam von der IUCN versucht aufzuzeigen, worauf bei Schutzmaßnahmen vorrangig geachtet werden muss, die sich überdies mit den menschlichen Interessen vereinbaren lassen sollten. Dazu müssen wir vor allem möglichst viel über die Biologie jeder einzelnen Art, ihr natürliches Verhalten und ihre Raum- und Ressourcenansprüche herausfinden, worunter auch jahreszeitliche Wanderungen fallen. Weitere wichtige Aspekte sind Beeinträchtigungen durch Menschen, Wechselbeziehungen mit ihren Viehherden sowie Rhythmik und Dynamik der betreffenden Ökosysteme. Nicht zuletzt kommt es darauf an, den Zebras oder Wildeseln Wasserstellen zu lassen und der Wilderei Einhalt zu gebieten. Ebenso muss die Erfassung der Bestandszahlen noch verbessert werden.

Längst haben Naturfreunde begriffen, dass solche Schutzbestrebungen nicht ohne die Mitarbeit der einheimischen Bevölkerung gelingen können. Das Verhältnis der Afar-Viehhirten Eritreas zu den Wildtieren stellt ein gutes Beispiel dar, wie sich in und mit der Natur leben lässt. Dieses Volk versteht sich seit Langem darauf, die Ressourcen mit anderen Lebewesen zu teilen. Wo immer man hinschaut: Die Menschen vor Ort brauchen dauerhafte Anreize, damit sie sich ernstlich für Naturschutzbestrebungen interessieren und sich auch selbst langfristig dafür einsetzen. Sie müssen daraus Nutzen ziehen, dass sie Ressourcen erhalten. Vielerorts dürften an erster Stelle Einnahmen durch Touristen überzeugen, welche die Wildtiere in ihrer natürlichen Umwelt sehen möchten. Aber auch andere Konstellationen sind denkbar. Was im Einzelfall am besten ist, muss jede Gegend für sich herausfinden. Die Erträge aus solchen Programmen können dann in Schulen, das Gesundheitswesen und die tierärztliche Versorgung investiert werden.

Leicht ist unser Ziel nicht zu erreichen. Doch wird es sich lohnen, die vorgeschlagenen Maßnahmen durchzusetzen. Sie bieten die beste Gewähr dafür, dass Tiere überleben, deren Kraft und Eleganz die Menschen schon vor Jahrtausenden bewunderten. ◁

Steppenzebras leben in der ost- und südostafrikanischen Savanne. Bis zu sechs erwachsene Stuten kann ein Harem umfassen, den ein Hengst verteidigt. Hinzu kommen die jüngeren und älteren Fohlen.

Neue Chance für das Urwildpferd?

Das Pferd in der Höhle von Lascaux in Südfrankreich malten Menschen vermutlich vor über 15000 Jahren.

Ein Hengst treibt die Stuten seines Harems zusammen.

LINKS: CORBIS/BETTMANN; RECHTS: ROLEX AWARDS / HEINE PEDERSEN; UNTEN: PATRICIA D. MOEHLMAN

An mehreren Orten ihres früheren Verbreitungsgebiets in der Mongolei werden Przewalski-Pferde ausgewildert, unter anderem im Takhin-Tal (Foto). Zwar kamen schon etliche Fohlen zur Welt, doch ist ihr Überleben durch strenge Winter, von Zecken übertragene Krankheiten und Wölfe stets gefährdet.

PATRICIA D. MOEHLMAN

Große Pferdeherden gehörten für frühere Menschen in Europa, Asien und Nordamerika zur Natur. Sie sind längst verschwunden. Übrig blieben zuletzt nur die Wildpferde Zentralasiens. Doch zum letzten Mal wurde ein Przewalski-Pferd in freier Wildbahn wohl 1969 in der Wüste Gobi gesehen.

Das mongolische Wildpferd überlebte nur in Gefangenschaft. Immerhin rund eineinhalbtausend dieser Tiere gibt es heute. Sie stammen alle von nur zwölf Individuen ab, die Anfang bis Mitte des 20. Jahrhunderts eingefangen wurden.

Rund 250 dieser Pferde, darunter viele Nachzuchten in Freiheit, leben heute wieder in der Mongolei: im Takhin-Tal, in Hustain Nuruu und seit dem Jahr 2004 im Khomin-Tal. Die ersten Tiere wurden 1992 dorthin geflogen. Um sich auf die neue Umwelt einstellen zu können, blieben sie zunächst eine Zeit lang in riesigen Gehegen, sind inzwischen aber in Freiheit und werden weit gehend sich selbst überlassen. Damit sich gesunde und möglichst anpassungsfähige Populationen entwickeln können, wurde bei der Auswahl der ausgesetzten Tiere auf eine einigermaßen große genetische Verschiedenheit Wert gelegt.

Die Mongolen sind auf das Projekt stolz und trugen es von Anfang an entscheidend mit, sind Pferde doch ein wichtiges Symbol ihrer Geschichte. Allerdings gehört das Przewalski-Pferd als Art wohl nicht zu den Vorfahren unseres Hauspferds, da es zwei Chromosomen mehr hat. Die vor etwa 6000 Jahren in verschiedenen Gegenden gezähmten Pferde sahen ihm aber ähnlich.

Trotzdem lassen sich die beiden Arten miteinander kreuzen, und die Nachkommen sind fruchtbar. Bei der Etablierung der Wildpopulationen muss man darum vorsorgen, dass keine Vermischungen mit im Freien gehaltenen Hauspferden vorkommen.

Tatsächlich ergeben sich bei der Wiederansiedelung mehr Schwierigkeiten als gedacht. So erleben wir nun, wie wichtig und schwer es für die Pferde ist, dass sie lernen, sich vor Raubfeinden – vor allem Wölfen – in Acht zu nehmen. Auch hatten wir zum Beispiel nicht mit verheerenden Krankheiten durch Zeckenbisse gerechnet. Nimmt man zudem die Kosten für die Transporte, die Betreuung und die begleitende Überwachung der neuen Bestände, so ergibt die ernüchternde Bilanz: Am vernünftigsten schützt man eine Art, bevor sie in der Wildbahn ausstirbt.

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE

Patricia D. Moehlman erforscht seit 35 Jahren die Verhaltensökologie und die Evolution der Paarungssysteme von Pferdearten und Raubtieren. Um den Schutz der letzten afrikanischen Wildesel bemüht sie sich seit dem Jahr 1989. Dazu arbeitet sie in Somalia, Äthiopien und Eritrea mit behördlichen Mitarbeitern und Viehhirten zusammen. Wesentlich kümmert sie sich dabei um die Schulung sowie die wissenschaftliche Ausbildung der Mitarbeiter. Der Equidenspezialistengruppe der IUCN steht sie seit 1997 vor. Finanzielle Unterstützung erhielten die Schutzprogramme von Mary Pearl und dem Wildlife Trust, ferner von der Whitley-Laing-Stiftung, dem Zoo von St. Louis, der Wildlife Conservation Society und der African Wildlife Foundation.

Natural and sexual selection and the evolution of multi-level societies: Insights from zebras with comparisons to primates. Von D. I. Rubenstein und M. Hack in: Sexual selection in primates: New and comporative perspectives. Von P. M. Kappeler und C. P. van Schaik (Hg.). Cambridge University Press, 2004

Equids: Zebras, asses and horses: Status survey and conservation action plan. Von P. D. Moehlman (Hg.). IUCN – The World Conservation Union, Gland, Schweiz, 2002

The african wild ass *(Equus africanus)*: Conservation status in the Horn of Africa. Und: Feral asses *(Equus africanus)*: Intraspecific variation in social organization in arid and mesic habitats. Beide Artikel von P. D. Moehlman et al. in: Applied Animal Behavior Science, Bd. 60, Nr. 2–3, S. 115 und S. 171, 15. November 1998

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

DAS TATTOO

Bilder, die unter die Haut gehen

Eine alte Tradition wirft neue Fragen auf.

Von Bernhard Gerl

Vor zwanzig Jahren noch stigmatisierten Tätowierungen ihren Träger zum Außenseiter, heute sind sie gesellschaftsfähig. Fast zehn Prozent der Deutschen tragen Rosen, Adler, geometrische Muster und anderes als Körperschmuck. Manche Tattoos zieren Arm oder Schulter, andere offenbaren sich nur dem Intimpartner, und eine dritte Variante soll gar nicht als Tätowierung erkannt werden: so genanntes Permanent-Make-up, das Lippen verbreitert oder Augenbrauen dunkler wirken lässt.

Weil sich die Zellen der obersten Hautschicht (Epidermis) regelmäßig erneuern, verschwindet dort aufgebrachte Farbe nach einigen Wochen. Erst in der ein bis vier Millimeter tiefer liegenden Lederhaut (Dermis) bleiben Farbpigmente zum großen Teil erhalten. Zwar versuchen die Gesundheitspolizisten des Körpers, die Makrophagen (Fresszellen), diese enzymatisch oder chemisch zu zerstören. Doch dazu müssen sie die Pigmente aufnehmen. Die winzigen Kristalle lassen sich nicht nur nicht abbauen, sie nutzen obendrein diese Gelegenheit, um miteinander zu verbacken. Die Fresszellen schwellen an und viele können ihre Fracht nicht einmal mehr in Blut- und Lymphgefäße abtransportieren. Aus Sicht des Immunsystems werden die Pigmente unschädlich gemacht, indem sie mit einer Proteinhülle abgekapselt werden.

Um in tiefere Schichten zu gelangen, muss die Haut verletzt werden. Tattookünstler verwenden dazu Tätowierungsmaschinen, in denen sich drei bis fünfzehn Nadeln mit fünfzig bis dreitausend Stichen pro Minute auf- und abbewegen. Zuvor taucht man sie in die gewünschte Farbe, die durch Kapillarkraft in die Führung der Nadeln gezogen wird. Beim Tätowieren fließt diese Suspension außen an den Nadeln herunter – sie haben keinen Hohlraum wie eine Spritze. Teile davon dringen mit dem Metall bis in die Lederhaut ein und werden dort abgestreift.

Je größer das Bild oder Muster, desto großflächiger die verletzte Hautpartie. Wie bei jeder Wunde besteht die Gefahr von Infektionen. »Ein gutes Tattoostudio achtet deshalb peinlich auf die Hygiene, verwendet nur Einmalnadeln, -farbbehälter und -handschuhe sowie sterilisierte Griffe und benutzt andere Teile der Tätowierungsmaschinen fachgerecht«, erklärt Rald Michel vom Tintenhersteller »Deep Colours!« in Neuburg. Entsprechende Vorschriften sind in Deutschland übrigens Ländersache.

Dennoch: Die Farbstoffe bergen ein nur schwer kalkulierbares Gesundheitsrisiko. Laut dem Berliner Bundesinstitut für Risikobewertung fehlen gesetzliche Vorschriften für Reinheit, Qualität und gesundheitliche Unbedenklichkeit. Da keine Stoffe auf die Haut gebracht werden, haben Verordnungen für Kosmetika keine Gültigkeit. Regelungen aus dem pharmazeutischen Bereich kommen ebenfalls nicht zur Anwendung, denn mangels wissenschaftlicher Modelle für die biologischen Wirkungen gibt es weder verbindliche Positiv- noch Negativlisten von Tattoofarben. Deshalb sind Verunreinigungen mit Schwermetallen und Bakterien nicht selten, warnt der Dermatologe Wolfgang Bäumler von der Universität Regensburg. Einige der beliebten Azo-Pigmente, die leuchtend bunte Bilder ergeben, stammen aus Großproduktionen für Autolacke – mit den entsprechenden niedrigen Anforderungen an die Reinheit. Forscher haben bei diesen Farben besondere Bedenken, denn manche davon zerfallen unter UV-Licht in gesundheitsschädliche oder Krebs erregende Stoffe wie Amine, Nitrotoluol oder Methyl-Niroanilin.

Gerade Ärzte, die Tätowierungen wieder entfernen sollen, wünschen sich Datenblätter der Farben, weil sie nur so die richtige Laserwellenlänge bestimmen können. Aber auch Tattoostudios könnten von Positivlisten profitieren, denn die amerikanische »Food and Drug Administration« hat bereits im Juli 2004 wegen der Farbstoffproblematik Alarm geschlagen: Erste Schadenersatzprozesse sind nur noch eine Frage der Zeit.

Für alle, die eine Tätowierung nach einiger Zeit bereuen – Skeptiker behaupten, fast die Hälfte aller so Geschmückten tut dies irgendwann – bieten Hautärzte eine zeitaufwändige und relativ teure Laserbestrahlung an. Sie soll die Farbpigmente ausbleichen oder zerstören – mit dem Risiko, dass dabei die erwähnten Schadstoffe entstehen. Da aber kaum jemand weiß, welche der mehreren hundert Farbmixturen unter der Haut stecken, können solche Behandlungen fehlschlagen. Dann hilft nur Kreativität, wie bei Pamela Anderson: Nach der Trennung von ihrem Mann wurde aus dem »Tommy« ihre »Mommy«. ◁

Der Autor **Bernhard Gerl** arbeitet als freier Fachjournalist in Mainz.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Das Tätowieren hatte in Französisch-Polynesien schon eine lange Tradition, als James Cook 1769 die Inseln entdeckte.

WUSSTEN SIE SCHON?

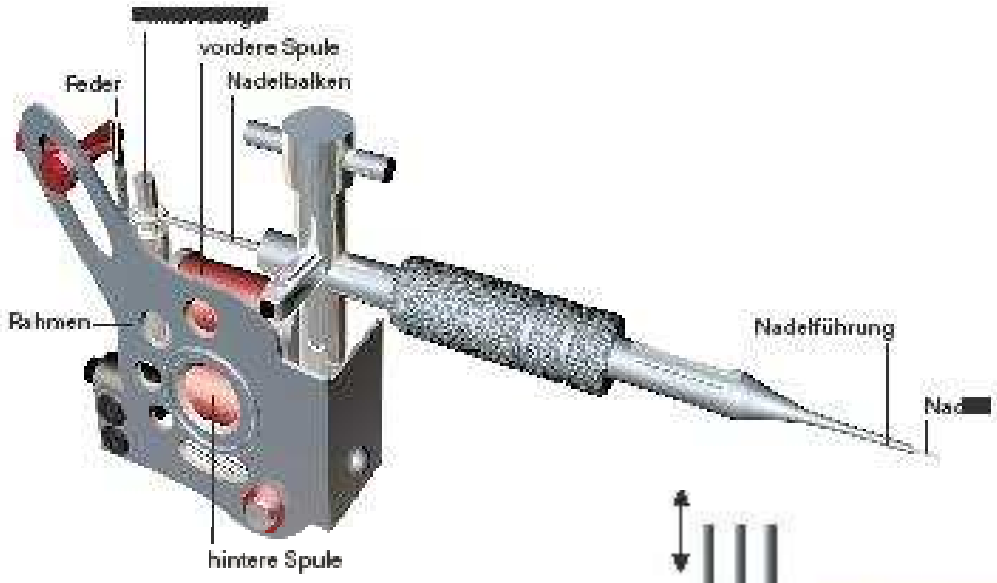
▶ **Der Gletschermann Ötzi** trug bereits vor 5000 Jahren insgesamt fünfzig Zeichen auf Rücken, Fußknöcheln und Knien: die ältesten bekannten Tätowierungen. Als Farbstoff diente Holzkohle. Aus der Lage dieser Punkte schlossen Forscher, dass Medizinmänner dort mit Akupunktur Ötzis Gelenkschmerzen lindern wollten, denn auch heute noch werden in der chinesischen Medizin an diesen Stellen Nadeln gesetzt.

▶ **Die Bezeichnung Tattoo** prägte der Entdecker James Cook, der 1769 auf Tahiti, einer der Hauptinseln Französisch-Polynesiens, Tätowierte sah. Dort stand das Wort »tatau« für »kennzeichnen«.

▶ **Ein leichtes Kitzeln, ein heftiger Stich** – die Schmerzen, die der Kunde im Tattoostudio ertragen muss, variieren. Sie rühren von den Nervenzellen in der Lederhaut her, die bei der Nadelung getroffen werden. Direkt über Knochen ist die Haut meist empfindlicher als über Muskelpolstern, deshalb schmerzt ein Schultertattoo mehr als eines am Oberarm. Auch die Fertigkeit des Tätowierers ist wichtig, denn er muss tief genug einstechen, um die Lederhaut zu erreichen, zu tiefe Stiche aber schmerzen und bluten unnötig.

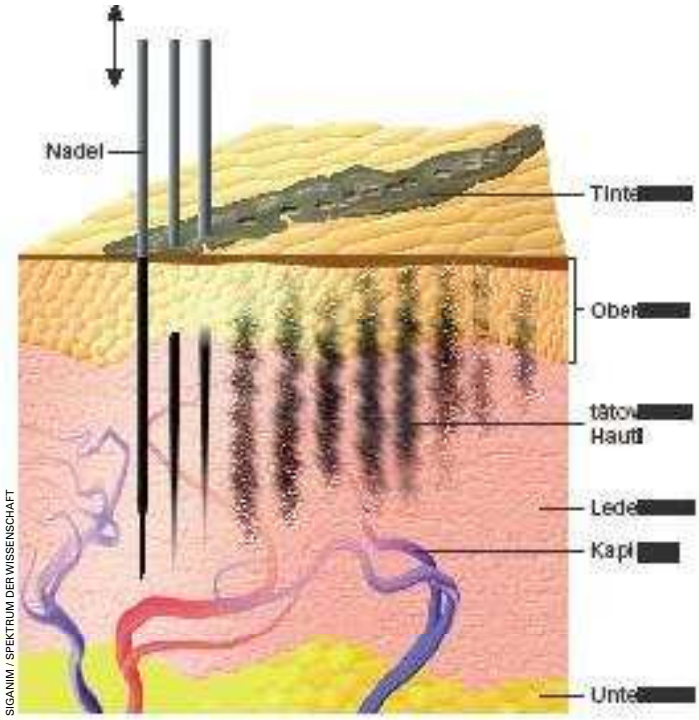
▶ **Die Pharmakokinetik der Tattoos** ist bislang kaum erforscht. Untersuchungen an Leichen in der Gerichtsmedizin zeigen aber, dass ein Teil der Pigmente durchaus in den Körper gelangt und zum Beispiel in den Lymphknoten oder in den Filterorganen Leber, Milz und Niere verbleibt.

▶ **Viele modebewusste Menschen** entscheiden sich für die Temptoos oder Bio-Tattoos, die – so versprechen Kosmetikstudios – nach einigen Wochen oder Monaten wieder verschwinden. Denn die Farbe wird nur in die 0,04 bis 1,5 Millimeter dicke Oberhaut gebracht, die sich innerhalb von dreißig Tagen erneuert. Weil diese Schicht aber so dünn ist, sticht die Nadel nicht selten zu tief und hinterlässt ein echtes Tattoo.



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT VORLAGE: MICKEY BEE

Fließt Strom durch die Spulen der Tätowiermaschine, erzeugt er ein Magnetfeld, das die Ankerstange anzieht und damit die Nadel in die Haut drückt. Dabei bewegt sich auch eine Feder und löst sich von einem Kontaktpunkt. Der Stromkreis wird unterbrochen und die Feder drückt die Ankerstange wieder in die Ausgangslage. Der Stromkreis schließt sich und die Bewegung beginnt erneut.



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Tätowiernadel befördert Farbpigmente aus dem Tintenfilm ein bis vier Millimeter tief in die Lederhaut (Dermis). Dort werden einige der Pigmente in den Papillarkörpern dauerhaft eingekapselt.

Wirklich intelligente Rechner

In einem so ereignisreichen Feld wie dem Supercomputing ist es gelegentlich Zeit für eine Zwischenbilanz: Was hat sich in den letzten zwanzig Jahren getan? Was ist in den nächsten zwanzig Jahren zu tun?

Von Horst Simon

Jede technische Entwicklung hat ihre »Leuchttürme«: Errungenschaften, die ihresgleichen so überragen, dass sie noch Jahrzehnte später als prägend für die Epoche im Gedächtnis bleiben.

Was das Hochleistungsrechnen angeht, war der »Leuchtturm« vor zwanzig Jahren zweifellos die »Cray-2«. Sie bot die damals atemberaubende Spitzenleistung von 2 Milliarden Rechenoperationen pro Sekunde (2 Gigaflops). Jeder ihrer vier Prozessoren (Einzelrechner) hatte mit 50 Kilowatt die Leistungsaufnahme eines mittelgroßen Pkws. Zur Abfuhr der dadurch produzierten Wärme diente ein damals äußerst innovatives Kühlsystem, das dem ganzen Gerät seine charakteristische, geradezu kuschelige Anmutung gab. Mit einer Standfläche von 1,6 Quadratmetern passte die Cray-2 ohne Weiteres in ein durchschnittliches Wohnzimmer – ein Konzertflügel ist wesentlich sperriger – und setzte sich damit deutlich von den hallenfüllenden Großrechnern ihrer Zeit ab.

Inzwischen sind die Supercomputer in ihren räumlichen Abmessungen wieder zu monumentaler Größe herangewachsen. Der »Earth Simulator«, der zweieinhalb Jahre lang, von 2002 bis 2004, die Rolle des Leuchtturms innehatte, füllt ein eigens für ihn errichtetes Gebäude von 3200 Quadratmeter Grundfläche (Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 14). Verglichen damit ist der gegenwärtige Spitzenreiter »Blue Gene/L« von IBM mit 250 Quadratmetern schon wieder ziemlich kompakt gebaut. Mit einem Stromverbrauch von 1800 Kilowatt liegt er im mittleren Lokomotivenbereich.

Das Wesentliche aber: Die Rechenleistung ist verglichen mit der Cray-2 um den Faktor 200 000 gestiegen. Wie kommt dieser enorme Fortschritt zu Stande? Was sind die bedeutendsten Innovationen der letzten zwanzig Jahre?

An dieser Stelle pflegt man das Moore'sche Gesetz zu zitieren: Mit der Regelmäßigkeit eines Naturgesetzes steigt die Leistung eines Mikrochips, des zentralen Computerbauteils, pro Jahr um den Faktor 1,5; Platzbedarf und Preis pro Rechenelement fallen mit der gleichen Rate. Dieser Erfahrungssatz feiert mittlerweile das vierzigste Jahr seiner Gültigkeit. Die merkwürdige Gleichmäßigkeit ist nur dadurch zu erklären, dass es nicht einzelne große Durchbrüche sind, sondern viele kleine Verbesserungen, die den Fortschritt vorantreiben. Und nach dem Moore'schen Gesetz allein hätte die Rechenleistung in zwanzig Jahren auch nur auf das 3300fache ansteigen dürfen.

Der Anstieg der Leistung pro Prozessor fällt sogar überraschend mager aus: von 500 Megaflops (Millionen Rechenakte pro Sekunde) bei der Cray-2 auf 700 bei Blue Gene/L – ein etwas unfairer Vergleich zwischen einem absoluten Spitzenmodell damals und einem Mehrzweck-Massenprodukt heute. Aber der gegenwärtige »Leuchtturm« koordiniert immerhin 131 072 dieser eher gewöhnlichen Rechenbauteile, was in diesem Fall den Fortschritt ausmacht.

Was hat sich sonst noch Wesentliches ereignet? Ich habe eine Hitliste erstellt, von der ich die »Top Five« im Folgenden präsentieren werde. Einige Innovationen, die das Arbeiten mit Supercomputern gravierend beeinflusst haben, sind nicht darunter. Das gilt insbesondere für das Internet und die rapide angestiegene Geschwindigkeit der Datenübertragung, die auch für das räumlich verteilte Rechnen *(grid computing)* genutzt werden; man bedenke, dass man mit der Cray-2 noch über ein ziemlich beschränktes Terminal kommunizieren musste und sich glücklich schätzen durfte, wenn 9600 Bit pro Sekunde über die Datenleitung gingen.

Wesentliche Fortschritte in der Software sind ebenfalls nicht unter den Top Five, weil entscheidende Ideen zwar in den letzten zwanzig Jahren zur Wirkung kamen, aber bereits weit früher, in den 1960er Jahren, entwickelt wurden. Das bezieht sich insbesondere auf hierarchische Algorithmen zur Lösung großer Gleichungssysteme, deren prominenteste Vertreter die Mehrgitterverfahren sind (Spektrum der Wissenschaft 4/1990, S. 78).

Hier also meine – persönliche und wohl nicht in allen Punkten mehrheitsfähige – Bestenliste.

Nummer 5: der Angriff der Killermikros. Dieser von Eugene Brooks vom Lawrence-Livermore-Nationallaboratorium geprägte Ausdruck hat sich durchgesetzt, vor allem weil jeder dabei an den Trash-Film »Angriff der Killertomaten« denkt. Gemeint sind die Mikrochips, die durch den massenhaften Einsatz in ge-

In diesem Modell des Weltozeans mit einem Gitter aus 177 Millionen Datenpunkten berechnen 448 Prozessoren mit bisher unerreichter Präzision den Transport von Wassermassen, die durch Gefrieren und Schmelzen unterschiedliche Salzgehalte aufweisen. Das Bild zeigt die Strömungsgeschwindigkeiten in 50 Meter Tiefe: von blau (0) bis rot (mehr als 1,5 Meter pro Sekunde).

wöhnlichen PCs ungeheuer billig geworden sind – so sehr, dass sie die eigens für Hochleistungsrechner entworfenen Prozessoren aus Preisgründen verdrängten. Durch Masse glichen sie aus, was ihnen an Eignung für das Schnellrechnen fehlte, und das zu weitaus günstigeren Preisen. Das machte Supercomputer für zahlreiche Institutionen erst bezahlbar und verschaffte so dem Hochleistungsrechnen einen gewaltigen Aufschwung.

Im Rückblick erscheint diese Entwicklung alles andere als unvermeidlich. Angesichts der guten Alternativen, die es gab, ist es sogar erstaunlich, dass ausgerechnet ein zweckentfremdetes, für eine ganz andere Anwendung vorgesehenes Bauteil sich so machtvoll durchgesetzt hat.

Nummer 4: Beowulf. Das Gute ist des Besseren Feind. Das gilt in noch stärkerem Maß für eine Innovation, die den Angriff der Killermikros noch einen Schritt weiter führte: Thomas Sterling vom California Institute of Technology und vom Jet Propulsion Laboratory (beides in Pasadena) entwickelte Ende der 1990er Jahre eine Software, mit der man nicht nur die massengefertigten PC-Mikrochips verwenden konnte, sondern sich um deren Kommunikation untereinander nicht sonderlich kümmern musste.

Ein Beowulf-Cluster besteht aus vielen relativ lose zusammengestöpselten PCs und ist aus diesem Grund nochmals um Klassen billiger in der Anschaffung (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 88). Es war die »Demokratisierung des Hochleistungsrechnens«: Die Software wurde im Rahmen der »Open Source«-Bewegung von Anfang an offen gelegt und so für jedermann verfügbar – mit phänomenalem Erfolg: Clusterrechner eroberten im November 2005 mehr als die Hälfte der Plätze in der Top500, der Liste der 500 weltschnellsten Computer.

So groß wie der Erfolg war auch der angerichtete Schaden: Weil aus Preisgründen keine Innovation in der Rechnerarchitektur eine Anwendung gefunden hätte, kam der Fortschritt auf diesem Gebiet für fast zehn Jahre völlig zum Erliegen. Thomas Sterling hat sein eigenes Geisteskind inzwischen verstoßen und – frei nach Einstein – als »die größte Eselei meines Lebens« bezeichnet.

Nummer 3: die wissenschaftliche Visualisierung. Wissen Sie, was ein Vektorfeld ist und wie es aussieht? Es ist das Ziel aller Bemühungen, wenn es – zum Beispiel – darum geht, eine Strömung auszurechnen: Luft in einem Wirbelsturm oder gleich in der ganzen Atmosphäre, Verbrennungsgase in einem Motor oder entlang einer Turbinenschaufel, Luft über und unter einem Tragflügel … Ein Vektorfeld ist eine Funktion, die jedem Punkt im Raum einen Vektor, zum Beispiel den der Strömungsgeschwindigkeit, zuordnet.

Und genauso trocken und abstrakt sahen vor zwanzig Jahren die Ergebnisse mühsamer Simulationsrechnungen aus: Aus vielen Punkten eines Bilds ragten unbeholfen gezeichnete Vektorpfeile in die Gegend. Wo es besonders ungekämmt aussah, da waren die entscheidenden Stellen wie das Auge des Wirbelsturms oder die Stoßfront, die den Flugzeugflügel binnen Kurzem ruinieren würde. Bloß genau da sah man vor lauter Vektorpfeilen das Wichtige nicht mehr.

Hier hat sich Dramatisches getan. Farbe steht zur Verfügung, um eine weitere Dimension der Daten auszudrücken, die man bislang weglassen musste. Statt der abstrakten Vektoren lässt man die Computer sinnfällige Objekte zeigen, die der durch das Vektorfeld bestimmten Bewegung folgen: Kügelchen fliegen durch die Gegend, während ein künstliches, verblassendes Nachbild Richtung und Geschwindigkeit anzeigt. Bänder verlaufen in Strömungsrichtung. Oder es sieht so aus, als würde eingeblasener Rauch von der Strömung mitgerissen. Vor allem haben die Bilder laufen gelernt. Einen ereignisreichen Kurzfilm in flammenden Farben zu drehen ist einfacher geworden, als damals einen der unansehnlichen Schwarz-Weiß-Vektorigel darzustellen.

Das beeindruckt nicht nur Laien. Auch die Forscher selbst, die auf diese Weise das Unsichtbare sichtbar machen, entdecken in den von ihnen berechneten Kinofilmen Dinge, die ihnen in der abstrakten Form verborgen geblieben wären.

Nummer 2: MPI, das interne Telefonnetz eines Parallelrechners. Das innovativste Gebiet der Technik zeigt manchmal merkwürdige Anwandlungen von Trägheit. Ein krasses Beispiel ist die Programmiersprache Fortran. Mitte der 1950er Jahre, als sie erfunden wurde, war sie ein ▷

▷ phänomenaler Durchbruch, erlaubte sie doch dem Wissenschaftler, sein Problem in einer sinnfälligen Form an den Computer weiterzureichen, ohne sich allzu sehr um dessen Innenleben zu kümmern.

Bald gab es Programmiersprachen, die viel besser waren. Aber Fortran hat sie alle überlebt, aus zwei Gründen: Niemand mochte seine alten Programme, für die er viel Mühe aufgewendet hatte, wegwerfen; und ein Computer, der nicht bei Fortran-Programmen gute Leistungen vorweisen konnte, hatte keine Marktchance. So waren die Hardwarehersteller gezwungen, die technische Basis für ein völlig veraltetes Programmierungskonzept zur Perfektion zu treiben. Das ist ihnen gelungen, woraufhin die völlig veralteten Programme der Anwender auf diesen Maschinen besser liefen als die fortgeschrittenere Software.

Es sieht ganz so aus, als hätten wir in den letzten zwanzig Jahren eine getreue Wiederholung dieses Phänomens erlebt. Diesmal geht es um das Verfahren, mit dem die einzelnen Prozessoren eines Parallelrechners Informationen untereinander austauschen. Da die Geschwindigkeit des Speicherzugriffs weit geringer angewachsen ist als die Rechengeschwindigkeit, ist sie mittlerweile der am stärksten begrenzende Faktor. Es hilft dem Prozessor nicht, dass er rasend schnell rechnen kann, wenn er nicht rechtzeitig an die Zahlen kommt, mit denen er rechnen soll. Das klassische Konzept des gemeinsamen Speichers – alle Prozessoren greifen auf ein zentrales Datenlager zu – wurde daher zunehmend unpraktikabel. Zu häufig kommen sich die Einzelrechner beim Speicherzugriff in die Quere, wie auf dem Wühltisch im Schlussverkauf.

Stattdessen verwenden sie eine Art Telefon: Wer eine Neuigkeit für einen Kollegen hat, schaltet eine Leitung exklusiv zu diesem und ist ebenso wie der Empfänger ein Weilchen mit Nachrichtenübermittlung *(message passing)* beschäftigt. Nicht nur die Arbeitszeit, auch die Leitungskapazität ist knapp, weswegen das Telefonieren gut organisiert sein will.

Noch Ende der 1980er Jahre wurde auf diesem Gebiet intensiv geforscht. Aber von den zahlreichen innovativen Projekten, die damals verfolgt wurden, sind die meisten in Vergessenheit geraten. Man erinnert sich kaum noch an ihre Namen.

Die weitere Entwicklung hat etliche Züge mit der biologischen Evolution gemeinsam: Sowie eine neue Umwelt – die massiv-parallelen Rechner – besiedelbar wurde, gab es zunächst eine Explosion der Formenvielfalt. Zahlreiche Lösungen desselben Problems konnten eine Weile koexistieren; aber dann machte sich bemerkbar, dass Supercomputing doch nur ein ziemlich kleines, inselartiges Ökosystem ist. Eine Art nach der anderen starb aus.

Unter den letzten Überlebenden waren sinnigerweise ein Abkömmling des Dinosauriers Fortran namens HPF *(High-Performance Fortran)* und eine Sammlung von elementaren Verfahren mit dem schlichten Namen MPI *(Message Passing Interface)*. Und Letzteres wurde ungefähr ab 1998 zum De-facto-Standard des Hochleistungsrechnens. Es ist zu befürchten, dass ihm eine ähnliche Lebensdauer beschieden ist wie der Sprache Fortran.

Ein veraltetes Programmierungskonzept, zur Perfektion getrieben, hat alle anderen überlebt

Warum hat sich ausgerechnet MPI durchgesetzt? Nicht wegen seiner prinzipiellen Überlegenheit. Das Konzept war schon Mitte der 1980er Jahre, als es noch aktuell war, eher hausbacken. Vielmehr handelt es sich, wie bei Fortran, um eine Koevolution mit der Umwelt! Die Hardware hat sich so entwickelt, dass MPI darauf am besten gedeihen konnte. Denn das war eine Hauptforderung der Kunden. Vielleicht lag es auch mit daran, dass die Anforderungen, die diese Kommunikationssoftware an die Maschinen stellte, am leichtesten zu realisieren waren; oder der Chefkonstrukteur eines Herstellers war davon überzeugt, dass MPI sich durchsetzen würde, investierte entsprechend viel in die Entwicklung geeigneter Hardware und machte damit seine eigene Prognose zur Realität.

Nummer 1: der Ausgang aus dem selbst verschuldeten Pessimismus. Es wird manchen überraschen, dass auf Platz 1 meiner Hitliste weder Soft- noch Hardware steht, noch nicht einmal das Konzept einer solchen. Vielmehr fand nach meiner persönlichen Auffassung die weitaus bedeutendste Umwälzung ausschließlich in den Köpfen der Beteiligten statt.

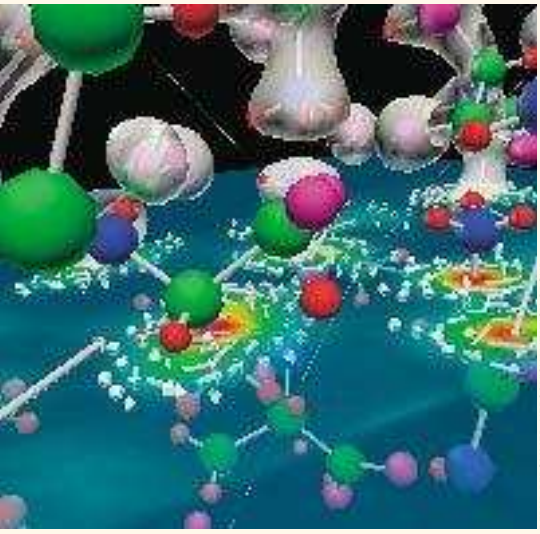
Aus Magnetresonanz-(NMR-)Daten wurden nicht nur die Positionen der Atome in einem Kristall aus der Aminosäure Alanin visualisiert, sondern auch (mit Vektorpfeilen) die vom Magnetfeld induzierten elektrischen Ströme.

Es handelt sich um die Abkehr von einem Irrtum, der sehr hartnäckig war, weil er eine allgemeine, leicht einzusehende Wahrheit wiederzugeben schien. Delegiert man eine große Arbeit an N Sklaven, statt sie allein zu machen, dann sinkt die insgesamt benötigte Zeit theoretisch auf $1/N$. Aber wenn es sich um Rechenarbeit handelt, stimmt das nicht ganz. Irgendjemand muss ja die Teilergebnisse, welche die Sklaven ausgerechnet haben, zum Gesamtergebnis zusammenfassen. Bei großen Rechenaufgaben fallen derartige Arbeiten typischerweise immer wieder an. So ist zum Beispiel aus allen Einzelergebnissen ein Durchschnitt oder Ähnliches zu bilden, den sämtliche Sklaven zur Fortführung der Rechnung benötigen.

Nehmen wir an, bei einem großen Rechenprojekt betrage der nicht aufteilbare (der »serielle«) Anteil ein Prozent, und die restlichen 99 Prozent seien parallelisierbar. Die Arbeit nehme mit einem einzigen Prozessor hundert Stunden in Anspruch. Dann ist ein Parallelrechner mit hundert Prozessoren in knapp zwei Stunden fertig: Eine Stunde lang sind sie alle fleißig, und eine Stunde entfällt auf die Pausen, in denen der serielle Kollege das Zusammenfassen erledigt. Immerhin verfünfzigfacht sich dadurch die Rechengeschwindigkeit.

Aber: Tausend statt hundert Prozessoren auf dasselbe Problem anzusetzen bringt nicht viel. Die Rechenzeit sinkt – beim zehnfachen Aufwand – von knapp zwei Stunden auf eine Stunde und knapp sechs Minuten, und die tausend Sklaven stehen nicht die Hälfte, sondern ungefähr 90 Prozent der Zeit untätig herum. Und wenn es unendlich viele Prozessoren wären, würde die Gesamtzeit immer noch nicht unter eine Stunde sinken. Der *speed-up*, der Zuwachs an Geschwindigkeit, ist auf den Faktor 100 beschränkt, oder allgemein auf 1 geteilt durch den seriellen Anteil.

Diese unbestreitbar zutreffende Gesetzmäßigkeit ist als »Amdahl's Law« be-



BERND PFROMMER, NERSC VISUALIZATION GROUP

kannt geworden, weil Gene Amdahl, ein Pionier der Hardwareentwicklung, sie bereits 1967 formuliert hat. Eine Folgerung scheint offensichtlich: Mehr als einige hundert, allenfalls tausend Prozessoren zu einem Parallelrechner zusammenzuschließen ist nichts als Materialverschwendung. Gleichwohl ist sie falsch.

John Gustafson, der heute beim Computerhersteller Clearspeed arbeitet, hat 1988 den verborgenen Denkfehler auf den Punkt gebracht. Amdahls Gesetz trifft zu, wenn man wirklich dasselbe Problem, das man bisher auf einem konventionellen (seriellen) Rechner bearbeitete, auf einen Parallelrechner überträgt. Das kommt aber praktisch nicht vor. Kaum hat der Nutzer die bessere Hardware zur Verfügung, stellt er ihr ein größeres Problem! Statt meteorologische Daten wie Temperatur und Windgeschwindigkeit alle zehn Kilometer zu berechnen, überzieht der Wirbelsturmforscher sein Rechengebiet mit einem dichteren Netz von einem Kilometer Maschenweite und beschäftigt hundertmal so viele Prozessoren. Nur der Aufwand für die Zusammenfassung der Ergebnisse ist nicht wesentlich größer geworden.

Wenn es also nicht um ein konkretes Problem geht, sondern um eine Familie von Problemen mit zunehmendem Rechenaufwand, dann sind sehr wohl *speedups* erreichbar, die gleich der Zahl der Prozessoren sind oder nur knapp darunter liegen. Parallelisierung, auch mit Zehntausenden von Prozessoren, ist ein lohnendes Geschäft. Auch das ist nicht schwer einzusehen; aber es hat Jahre gedauert, bis sich Ende der 1980er, Anfang der 1990er Jahre diese Einsicht in den Köpfen der Supercomputer-Betreiber durchsetzte. Zu viele Komplikationen hatten den Blick verstellt, insbesondere die Tatsache, dass mit zunehmender Prozessoranzahl die interne Kommunikation immer schwieriger wird. Ohne diese Einsicht jedoch hätte der frühe Erfolg der Parallelrechner so nicht stattgefunden.

Kurzfristiger Trend: Rechnen mit 100 000 Prozessoren. Die folgenden Ausführungen sind weitaus weniger konkret als die bisherigen über die Vergangenheit. Denn nach einem bekannten Sprichwort sind Prognosen schwierig, vor allem, wenn sie die Zukunft betreffen. Aber für die unmittelbar vor uns liegende Zukunft sind die Anforderungen einigermaßen klar.

Was die schiere Rechengeschwindigkeit angeht, gerät das Moore'sche Gesetz bereits jetzt an seine Grenzen. Eine weitere Erhöhung der Taktrate geht mit einer Wärmeproduktion und anderen Problemen einher, die kaum noch zu beherrschen sind. Deswegen gehen die Chiphersteller bereits dazu über, mehrere Prozessoren in ein und denselben Chip einzubauen (die »Multi-Core«-Technik, siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 90). Will man die Leistung der schnellsten Rechner weiter steigern, so funktioniert das nur über die Anzahl der Prozessoren.

Die aktuelle Liste der 500 weltschnellsten Computer, die Top500, zeigt das in aller wünschenswerten Deutlichkeit: Die Nummer 1 der Liste, Blue Gene/L von IBM, vollbringt ihre 280 Teraflops (Billionen Rechenoperationen pro Sekunde) mit 131 072 Prozessoren und liegt mit beiden Werten um eine ganze Größenordnung vor der Konkurrenz. (Der »Earth Simulator«, der vor nicht allzu langer Zeit die Amerikaner das Fürchten lehrte, ist auf Platz 7 abgerutscht.) Stand der Technik war bis zum vorigen Jahr, dass man einige tausend bis zu etwa 10 000 Prozessoren zu einigermaßen disziplinierter Kooperation bringen kann. Aber wenn wirklich 100 000 Köche in demselben Brei rühren, sind neue Ideen gefordert.

Das lässt sich illustrieren an der Hauptbeschäftigung wissenschaftlich rechnender Computer, dem Lösen linearer Gleichungssysteme. Ein solches Gleichungssystem ist die mathematische Darstellung der Beziehungen zwischen zahlreichen »Elementen« (Unbekannten). Dabei ist ein Element zum Beispiel eines von vielen Molekülen in einem wild bewegten Gas; oder es ist ortsfest und repräsentiert Temperatur, Dichte und Geschwindigkeit der an ihm vorbeiströmenden Luft. Man denke sich je zwei Elemente, die etwas miteinander zu tun haben – zum Beispiel Kräfte aufeinander ausüben – durch einen Faden verbunden; dann ergibt sich ein großes Netz, und die Lösung des Gleichungssystems läuft darauf hinaus, das Netz aufzuknoten, sodass klar wird, was mit dem einzelnen Element geschieht.

Im Prinzip könnte jedes Element mit jedem zu tun haben. Allerdings wäre dann selbst bei bescheidenen 100 000 Elementen der Versuch einer Lösung zum Scheitern verurteilt: Selbst ein Supercomputer würde Jahre mit dem Aufdröseln dieses dicht geknüpften Netzes zubringen. Und es sind immer wieder aufs Neue Gleichungssysteme mit Millionen von Elementen zu lösen.

Also kann der Rechner nicht die Standardverfahren anwenden, sondern muss auf die Struktur des Beziehungsnetzes eingehen. Am schönsten wäre es, wenn man die Elemente in lauter Kleingruppen aufteilen könnte, deren Mitglieder viel miteinander und kaum etwas mit Auswärtigen zu tun haben. Dann könnte nämlich jeder Prozessor sich intensiv mit einer Kleingruppe befassen, und der mühsame und Zeit raubende Informationsaustausch unter Prozessoren hielte sich wegen der spärlichen Außenbeziehungen in erträglichen Grenzen.

Solche Kleingruppen sind durchaus zu finden. So haben Gasmoleküle immer dann miteinander zu tun, wenn sie räumlich dicht benachbart sind. Nur ändert sich häufig die Gruppenzugehörigkeit, weil die Moleküle sich bewegen. Auf solche unstrukturierten Probleme sind die klassischen Vektorrechner, deren Stärke es ist, viele gleiche Operationen in vorherbestimmter Reihenfolge fließbandartig durchzuführen, nicht vorbereitet.

Obendrein darf man bei der Verständigung der Prozessoren untereinander nicht mehr von der Fiktion ausgehen, ein ▷

Wenn hunderttausend Köche in einem Brei rühren, sind neue Konzepte für die Koordination gefordert

▷ »Telefongespräch« – eine MPI-Nachrichtenübermittlung – belege stets die gleiche Menge an Leitungen. Physikalisch ist ein Prozessor mit nur relativ wenigen Kollegen unmittelbar verbunden und muss die »entfernteren« über mehrere Teilstrecken hinweg ansprechen. Also sollte er sich möglichst nur mit seinen nächsten Nachbarn unterhalten, was umso schwerer zu erfüllen ist, je größer die Gesamtzahl der Prozessoren ist. Hier warten auch auf die Softwarespezialisten ganz neue und sehr interessante Aufgaben.

Mittelfristig: ein neues Ökosystem für Supercomputer. Für die Herausforderungen, die ungefähr in den Jahren 2010 bis 2018 auf uns zukommen werden, möchte ich wieder die biologische Metapher bemühen. Die Vektorrechner wie die Cray-2, die vor zwanzig Jahren unsere Bewunderung erregten, waren aus heutiger Sicht so etwas wie Dinosaurier. Sie gediehen über Jahre hinweg auf angehäuftem Fortran-Code, ihre Nahrungsquellen, sprich das Geld von Militär und Ölbohrindustrie, schienen unerschöpflich, und sie waren an diese Umwelt perfekt angepasst. Ausgestorben sind sie binnen weniger Jahre – nicht etwa aus Unfähigkeit, sondern weil ihre Umwelt sich binnen weniger Jahre völlig verändert hat. Die militärische Energiequelle ist weit gehend versiegt, und eine konkurrierende Spezies, die PC-Cluster mit MPI-Verbindung, hat die Dinos aus ihrer ökologischen Nische verdrängt.

Das Aussterben hat – in der biologischen wie in der Technik-Entwicklung – nicht nur eine Ursache, sondern viele. Deswegen kann auch der Wiedereinführung einer ausgestorbenen Art in ihre frühere Nische kein Erfolg beschieden sein. Cray hat das mit seinem Vektorrechner Cray-X1 versucht und einen Achtungserfolg erzielt (Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 85), aber auch nicht mehr.

Ein Versuch zur Einführung einer völlig neuen Art ist ebenfalls gescheitert. Der eingangs erwähnte Superrechner Blue Gene/L von IBM beruhte auf einem gänzlich neuen Konzept; aber seinen phänomenalen Erfolg hatte er erst, nachdem er von 1999 bis 2005 allmählich zu einem MPI-Cluster mutiert war.

Das neue Ökosystem lebt von dem ungeheuer reichlichen, billigen Angebot an standardisierten PC-Mikrochips, und es gedeiht, weil die Industrie hohe Rechenleistungen in großen Mengen verlangt. Softwarekomponenten wie das genannte MPI sind integrale Bestandteile dieses sehr stabilen Ökosystems.

Wir können nicht einmal Turbulenz gut modellieren – wie dann erst das menschliche Denken?

Nur die Anwender am oberen Ende der Leistungsskala sind mit diesem Zustand nicht wirklich glücklich. Es ist abzusehen, dass mittelfristig die Cluster an ihre Grenzen geraten werden. Dann ist es nicht damit getan, einfach größere Cluster zu bauen. Ein ganzes Ökosystem muss her, mit Bestandteilen, die lange Zeit zum Heranwachsen benötigen.

Der weltweite Markt der Höchstleistungsrechner ist mit einem Volumen von einer Milliarde Dollar relativ klein. Auf der Nachfrageseite finden sich fast ausschließlich öffentliche Geldgeber – keine gute Nachricht für die Industrie, denn die öffentliche Nachfrage kann sich plötzlich und unkalkulierbar ändern. Der Nationale Forschungsrat der USA (*National Research Council*, NRC) hat daher in seinem jüngsten »Report on the future of supercomputing« ein langfristig angelegtes Engagement der öffentlichen Hand eingefordert.

Langfristig: kein Homunkulus. Auch wenn die Computerbauer viel Fantasie aufbringen, um die verschiedensten physikalischen Hürden zu umgehen: Spätestens wenn ein Bit durch weniger als ein Elektron repräsentiert werden soll, wird die Gültigkeit des Moore'schen Gesetzes ein Ende finden. Extrapoliert man die bisherige Wachstumskurve, so wird das zwischen 2015 und 2020 der Fall sein.

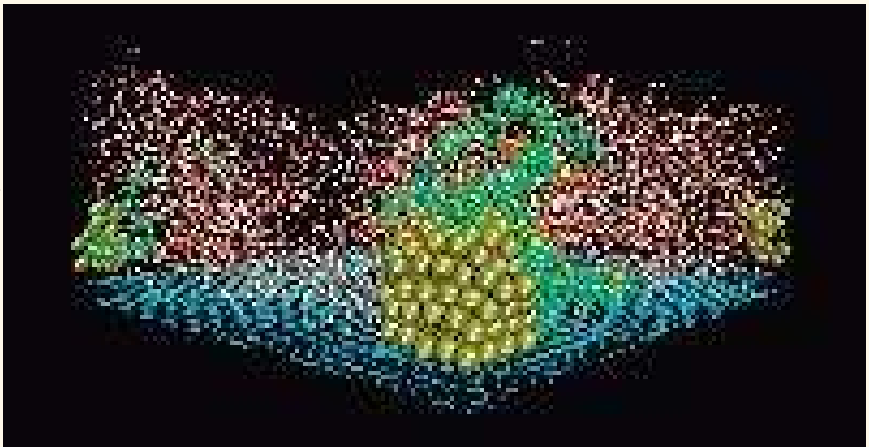
Damit ist absehbar, dass in den nächsten zwanzig Jahren neue Technologien die gegenwärtige Halbleitertechnik ablösen werden. Ob es die Quantencomputer sein werden, Nanotechnologie, biologische Rechner oder ein anderer der zahlreichen Forschungsansätze, ist noch völlig unklar.

Wenn – mit welcher Technologie auch immer – die Leistung der Rechner auch nach 2020 weiterhin exponentiell zunehmen sollte, wird man um 2030 zum Preis eines PCs eine Informationsverarbeitungskapazität kaufen können, welche die des menschlichen Hirns übertrifft. Berufspropheten wie Hans Moravec und Ray Kurzweil (Spektrum der Wissenschaft 1/2006, S. 100) werden nicht müde, uns die goldene Zukunft auszumalen, in welcher der Mensch das Denken endgültig an den Computer abtritt, weil der es in jeder Hinsicht besser kann.

Es ist zwar nicht unproblematisch, die Leistung des menschlichen Gehirns in Teraflops auszudrücken; aber bei dieser Einschätzung soll es uns auf eine oder zwei Größenordnungen nicht ankommen. Die Computer werden diese Zahl in wenigen Jahrzehnten in jedem Fall übertreffen.

Daraus allerdings direkt zu schließen, der Computer werde schon 2050 dem Menschen das menschliche Denken abnehmen können, halte ich für falsch. Der Harvard-Psychologe und Buchautor Howard Gardner hat mit seiner »Theorie der multiplen Intelligenzen« auf den Punkt gebracht, dass es abwegig ist, geistige Leistungen des Menschen mit einem Zahlenwert auf einer einzigen Skala messen zu wollen. Gardner zählt sechs Dimensionen

EDUARDO J. LAMAS, UNIV. OF SOUTH CAROLINA, DEPT. OF CHEMICAL ENGINEERING



◁ **Mit einem aus *first principles* hergeleiteten Modell berechnen Perla Balbuena und ihre Arbeitsgruppe an der Universität von South Carolina das Zusammenspiel zwischen Platin-Nanopartikeln (goldene Kügelchen) und Hilfspolymeren in einer noch zu entwickelnden Brennstoffzelle.**

der Intelligenz auf: verbal-linguistische, logisch-mathematische, räumliche, körperlich-kinästhetische, musikalische und interpersonale Intelligenz. Auf einer einzigen dieser Skalen, der logisch-mathematischen, übertrifft der Computer den Menschen um viele Größenordnungen. Auf allen anderen hat er bislang nur klägliche Resultate zu bieten.

Wenn aber erst einmal die Hardware zur Verfügung steht, dann wäre die Bereitstellung der übrigen Intelligenzformen nur noch eine Frage der geschickten Programmierung? Das glaube ich nicht. Nehmen wir ein sehr mechanisches Beispiel: die Turbulenz. Es gelingt seit einem halben Jahrhundert nicht, das Strömungsverhalten eines nur mäßig wilden Bergbachs einigermaßen befriedigend mathematisch zu modellieren, und die Chancen dafür, dass es in den nächsten fünfzig Jahren gelingt, stehen nach allgemeiner Überzeugung schlecht. Dabei handelt es sich um ein Problem, an dessen Lösung Flugzeug- und Raketenbauer – und nicht nur sie – brennend interessiert sind. Wenn also schon ein alltägliches Phänomen wie die Turbulenz allen Versuchen der mathematischen Modellierung widersteht – von einer Computersimulation ganz zu schweigen –, wie soll das mit dem ebenso alltäglichen, aber weitaus komplexeren Phänomen des menschlichen Denkens gelingen?

Nicht dass man es nicht versuchen würde. Am neu gegründeten »Brain Mind Institute« der Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) wird ein Höchstleistungsrechner vom Typ Blue Gene genau dafür eingesetzt. Henry Markram und seine Mitarbeiter haben das Fernziel, ein Gehirn *from first principles* zu verstehen: Die einzigen expliziten Annahmen, die in die Modellierung eingehen, betreffen die Funktion des einzelnen Neurons. Alles andere bis hin zum Gedächtnis oder gar zum Bewusstsein soll sich im Verlauf der Simulation ergeben.

Damit schließt sich der Kreis. Eine der kreativsten Anwendungen von heutigen Superrechnern ist es, das menschliche Gehirn zu simulieren. Ein derart simuliertes Gehirn ist in ferner Zukunft vielleicht fähig, wirklich intelligente Rechner zu bauen. ◁

Horst Simon hat an der Technischen Universität Berlin 1978 das Diplom in Mathematik abgelegt und 1982 an der Universität von Kalifornien in Berkeley promoviert. Seit 2004 ist er als Associate Laboratory Director für alle rechnerbezogenen Aktivitäten des Lawrence-Berkeley-Nationallaboratoriums in Berkeley (Kalifornien) zuständig: Forschung, Informationstechnik und Betrieb des Hochleistungsrechenzentrums NERSC. Dieser Artikel entstand aus einem Hauptvortrag, den Horst Simon bei der Internationalen Supercomputer-Konferenz (ISC 2005) in Heidelberg gehalten hat.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Intelligenzen. Die Vielfalt des menschlichen Geistes. Von Howard Gardner. Klett-Cotta, Stuttgart 2002

Reevaluating Amdahl's law. Von John L. Gustafson in: Communications of the ACM, Bd. 31, Nr. 5, S. 532, 1988. Online unter www.scl.ameslab.gov/Publications/Gus/AmdahlsLaw/Amdahls.html

Weblinks zu diesem Thema können Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis« finden.

Crossbars: Viel hilft viel

Nanoschaltkreise aus sich kreuzenden Nanodrähten könnten einmal dem Siliziumchip Konkurrenz machen. Sofern sie nicht zu sparsam ausgelegt werden.

Von Philip J. Kuekes, Gregory S. Snider und R. Stanley Williams

Es ist noch keine fünfzig Jahre her, da bildete ein einzelner Transistor das Herz einer elektronischen Schaltung, heute tummeln sich auf einem Chip fast eine Milliarde davon. Eine nach Gordon E. Moore, Mitbegründer des Chipherstellers Intel, benannte Regel prognostiziert eine Verdopplung der Transistorzahl in weniger als zwei Jahren. Die Konsequenz dieser rasanten technischen Entwicklung ist offensichtlich: eine vollständige Durchdringung unserer Arbeits- und Alltagswelt mit Daten verarbeitender Elektronik.

Doch die Grenzen dieser auf dem Halbleiter Silizium basierenden Technologie sind bald erreicht. Intels neueste Chipgeneration arbeitet bereits mit 65-Nanometer-Transistoren (millionstel Millimeter). Um sie auf etwa zehn Nanometern (nm), entsprechend dreißig Atomlagen, zu verkleinern, bedarf es zum Beispiel ganz neuer Fertigungsverfahren.

Weltweit suchen Forscher deshalb nach Alternativen zur etablierten Siliziumtechnologie, zumal viele Jahre Entwicklungsarbeit notwendig sein werden, um sie einzuholen. So nutzen Quantencomputer quantenmechanische Phänomene zur Informationsverarbeitung (Spektrum der Wissenschaft 4/2003, S. 48). Doch eine Realisierung ist erst in Jahrzehnten zu erwarten; es ist auch noch nicht klar, wie gut sie für kommerzielle Anwendungen geeignet sein werden. Soll eine Technologie bereits in zehn Jahren Marktreife erlangen, muss sie weit gehend auf der bisherigen Infrastruktur aufbauen, also in vorhandenen Produktionsanlagen zu fertigen sein, Kompatibilität zu gängiger Software aufweisen.

Trickreiches Gitterwerk

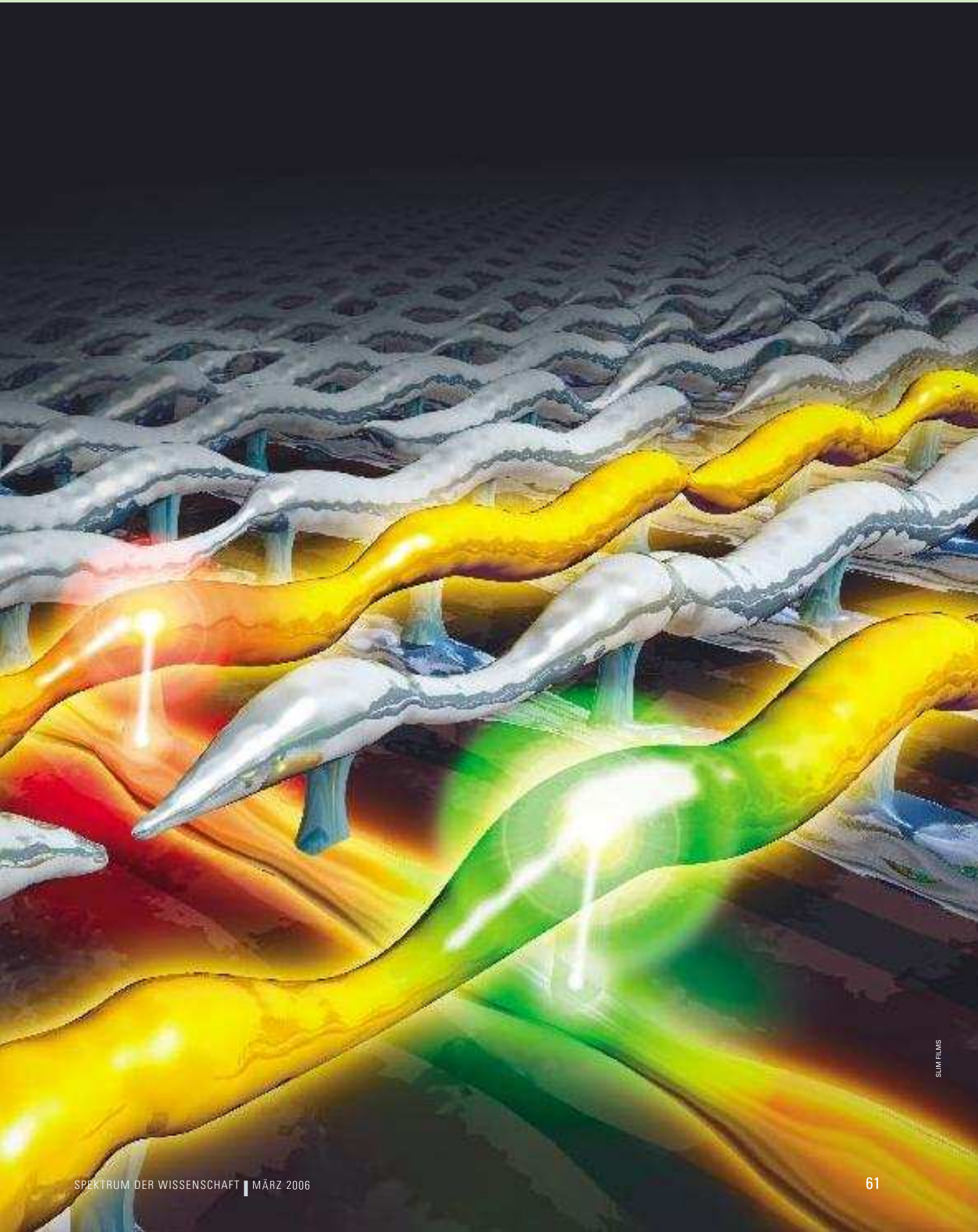
Unser Team von Hewlett-Packard hat sich deshalb der so genannten Crossbararchitektur verschrieben, die unseres Erachtens die größten Chancen aufweist. Eine »Crossbar« besteht aus einem Satz parallel verlaufender Nanodrähte (jeder weniger als 100 Atomlagen dick), die sich mit einem zweiten Satz kreuzen. Dazwischen befindet sich ein Material, dessen Leitfähigkeit über oder unter einem Schwellenwert liegen kann. So entsteht an jedem Kreuzungspunkt ein Schalter, der entweder auf »Ein« oder »Aus« steht.

Crossbars haben mehrere Vorteile: Das regelmäßige Muster der sich kreuzenden Nanodrähte macht die Herstellung relativ einfach, insbesondere im Vergleich zur komplexen Architektur der Mikroprozessoren. Die Anordnung in Gittern (fachlich Arrays) sorgt für niedrige Defektraten während der Produktion. Die Strukturen lassen sich aus einer Vielzahl von Substanzen und auf verschiedene Weisen herstellen. Dadurch ergibt sich viel Spielraum, vorhandene Designkonzepte auf neue Materialien zu übertragen. Zudem können diese geometrisch einfachen Schaltelemente als Speicher, Logikschaltkreise oder chipinterne Verbindungen dienen, was sie sehr attraktiv macht.

Als R. Stanley Williams 1995 von der Universität Kalifornien in Los Angeles (UCLA) zu HP kam, hatte er eigentlich keine Ambitionen in der Nanoelektronik. Als Chemiker wusste er, dass Milliarden von Bausteinen, jeder nur wenige Atome groß, bei Raumtemperatur keine perfekte Maschine ergeben können: Wärmebewegung der Atome und Strukturdefekte, insbesondere im Rahmen der Fertigung, beeinflussen bei solchen Größenordnungen die elektrischen Eigenschaften auf nicht mehr vernachlässigbare Weise. Für William lag daher der Schluss nahe, dass Nanoelektronik stets mit erheblichem Ausschuss verbunden sein müsse und sich somit nicht lohne.

Zum Glück begegnete er im Jahr darauf Philip J. Kuekes, einem Spezialisten für Computerarchitektur. Der berichtete Williams von einem Supercomputer namens Teramac, den er und andere (darunter der Dritte im Autorenbunde, Gregory S. Snider) entwickelt hatten. Tera- ▷

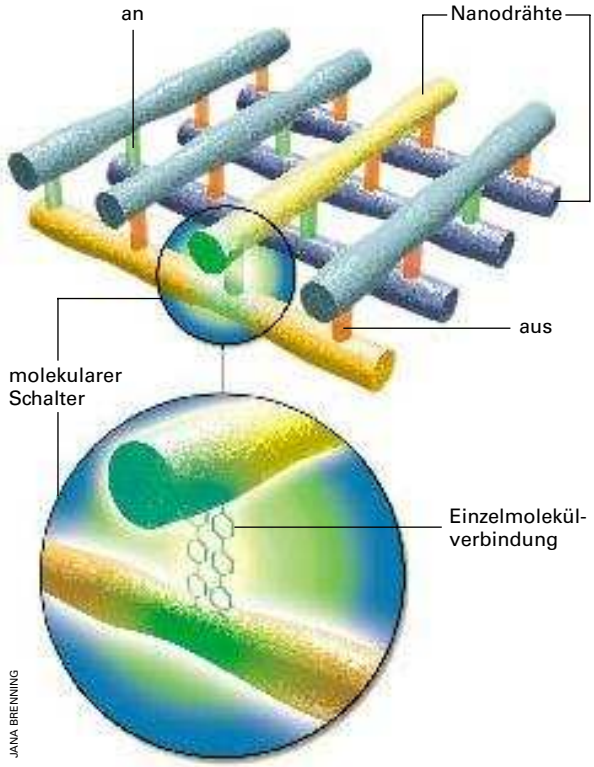
In dieser künstlerischen Umsetzung schalten so genannte Crossbars beim Anlegen einer Spannung von »ein« (grün) auf »aus« (rot) beziehungsweise von einer binären »1« auf »0«. Solche Elemente könnten die Basis molekularer Computer sein. Allerdings lassen sich Defekte auf Grund etwa von Wärmebewegungen in der Nanowelt nicht vermeiden (hier als Einschnürung oder Verdickung gezeichnet). Dagegen hilft aber Redundanz.



SLIM FILMS

»Ein« und »aus« an der Kreuzung

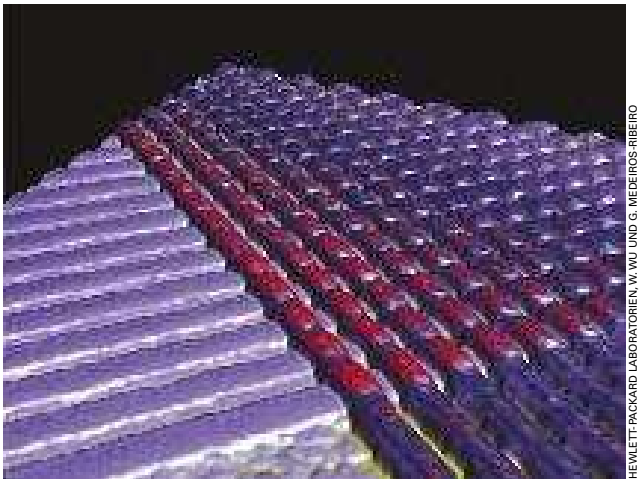
Ein Crossbar ist ein Schalter im Nanomaßstab. Er kann durch Anlegen einer geeigneten Spannung auf »ein« oder »aus« geschaltet werden. Die Hewlett-Packard-Forscher realisieren ihn als Kreuzungspunkt zweier Nanodrähte, die durch eine nur ein Molekül dünne Schicht voneinander getrennt sind. Im Grundzustand fließt darüber kein Strom, der Übergangswiderstand ist zu hoch (»Aus«, rote Punkte).



JANA BRENNING

Überschreitet eine anliegende Spannung geeigneter Polarität aber einen materialbedingten Schwellenwert, sinkt der elektrische Widerstand abrupt und Elektronen können fließen (»ein«, grüne Punkte). Der Schalter verbleibt so, bis eine hinreichend große Spannung mit umgekehrter Polarität ihn wieder in seinen Ausgangszustand zurückversetzt.

Einige der von den Autoren gebauten experimentellen Versionen wurden vor mehr als drei Jahren in einen bestimmten Zustand gebracht, und dieser hat sich seitdem nicht verändert. Wenn solche Schalter viele Male umgeschaltet werden können, lassen sich daraus sogar logische Schaltkreise bauen.



HEWLETT-PACKARD LABORATORIEN, W. WU UND G. MEDEIROS-RIBEIRO

Dieser Prototyp eines Crossbarrechners, aufgenommen mit einem Rasterkraftmikroskop, verfügt über 34 Nanodrähte (jeweils 30 Nanometer groß), die sich mit 34 weiteren kreuzen.

▷ mac arbeitete perfekt, obwohl 220 000 beziehungsweise knapp drei Prozent seiner Komponenten nicht funktionierten. Der Trick: Die Defekte wurden lokalisiert und die innere »Verdrahtung« durch eine spezielle Software so angepasst, dass solche Bereiche künftig unberücksichtigt blieben; natürlich war von vornherein genug Reserve vorgesehen.

Williams erkannte sofort, dass Teramacs Fehlertoleranz als Konzept für Nanocomputer taugte. Im Sommer desselben Jahres arbeitete er gemeinsam mit dem UCLA-Gastwissenschaftler James R. Heath daran, die Konzepte zum Bottom-up-Aufbau komplexer Strukturen (siehe Kasten S. 63) aus Nanopartikeln auf die Chipfertigung anzuwenden. Gemeinsam mit Kuekes und Snider publizierten die beiden ihre Idee 1998 im Fachblatt »Science« und reichten ein entsprechendes Projekt bei der Darpa ein, der Forschungs- und Entwicklungsorganisation des amerikanischen Verteidigungsministeriums (Defense Advanced Research Projects Agency). Dort setzte man große Hoffnungen auf die molekulare Elektronik und offerierte Fördermittel insbesondere für Vorhaben, nanoskalige Bauelemente zu vernetzen.

Öl statt Silizium

Unser HP/UCLA-Team packte diese Gelegenheit sogleich beim Schopf und kombinierte das Teramac-Konzept mit einer anderen HP-Entwicklung, dem Crossbar: Das Ministerium verlangte Ergebnisse innerhalb von zwei Jahren. Der ursprünglich für magnetische Speicherchips ersonnene Crossbar sollte sich auf Grund seiner kristallähnlichen Struktur chemisch erzeugen lassen. Um nun jede Nanodrahtkreuzung gezielt als Schalter zu nutzen, schlug Williams vor, ein elektrochemisch aktives Material als Trennschicht einzubringen; deren elektrischer Widerstand sollte mit einer an die beiden Zuführungen angelegten Spannung einstellbar sein.

Geeignete Substanzen fand J. Fraser Stoddard, der heute an der UCLA arbeitet: Rotaxane, organische Moleküle aus stab- und ringförmigen Anteilen. Wandert der Ring über den länglichen Bereich, verändert sich der elektrische Gesamtwiderstand des Moleküls. Stoddard gelang es, diese Substanz chemisch so zu verändern, dass sie »ölig« wurde. Ein Rotaxantropfen auf einer Wasseroberfläche bildete dann einen nur ein Molekül dicken Film. Den brachte Heath auf ein Substrat auf, das bereits eine Schicht der Nanodrähte trug. Um die obere Lage abzuscheiden,

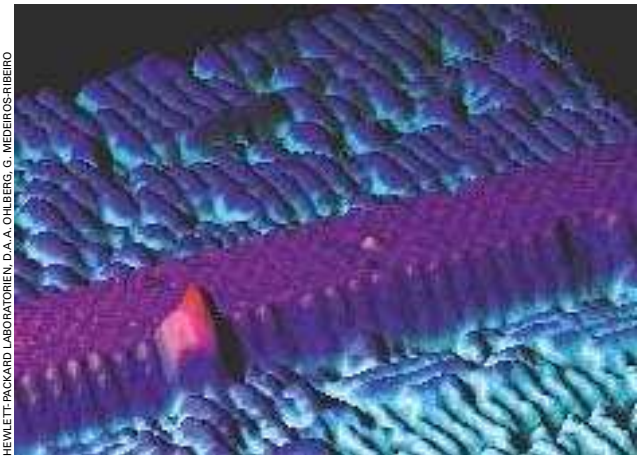
Top-down oder Bottom-up?

Im Bereich der nanotechnologischen Fertigung machen sich zwei Grundprinzipien Konkurrenz: Top-down und Bottom-up. Erstere ähneln herkömmlicher Chipherstellung mittels Fotolithografie, ergänzt durch chemische Ätzprozesse oder dem Aufbringen von Materialien, um die gewünschten elektrischen Eigenschaften zu erzeugen. Bottom-up-Methoden nutzen hingegen chemische oder biochemische Prozesse, bei denen sich Atome oder Moleküle selbst in der gewünschten Weise anordnen.

Die meisten Forscher sind der Ansicht, dass eine Kombination beider Ansätze zur Fertigung von Nanoschaltkreisen nötig ist.

Die Autoren verwenden Elektronenstrahl-Lithografie, um Negative der gewünschten Nanodrähte zu erzeugen. Diese prägen ihre Struktur in weiche Polymere, die anschließend durch Erhitzen oder Bestrahlen mit ultraviolettem Licht aushärten.

Auf diese Weise lassen sich beliebige Drahtgeometrien erzeugen, allerdings ist die Detailauflösung begrenzt: Der Abstand paralleler Drähte beträgt mindestens 60 Nanometer.



HEWLETT-PACKARD LABORATORIEN, D.A.A. OHLBERG, G. MEDEIROS-RIBEIRO

Das Tunnelrastermikroskop enthüllt Fehler auf der Oberfläche eines Bottom-up erzeugten Nanodrahts aus Erbium-Silizid. Der Draht ist etwa drei Nanometer beziehungsweise zehn Atomlagen dick. Die Höcker auf der Oberfläche sind einzelne Atome, Fehlstellen erscheinen schwarz.

leitete er Metalldämpfe durch eine Maske. Diese frühen Experimente brachten uns immerhin schon einige Patentanträge, einen Vorschlag für ein Darpa-Projekt – und einen weiteren Artikel in »Science«.

Basierend auf der Crossbarstruktur präsentierten unsere UCLA-Kollegen der Darpa im Jahr 2000 den ersten funktionsfähigen 16-Bit-Speicher. Dieser Erfolg veranlasste die Darpa, ein Folgeprogramm mit einem weit ambitionierteren Ziel zu bewilligen: die Fertigung eines 16-Kilobit-Speichers mit einer Dichte von 100 Milliarden Bits pro Quadratzentimeter. Das erfordert Fertigungstechniken, die in der Halbleiterindustrie voraussichtlich erst 2018 zur Verfügung stehen.

Dass elektrochemisches Schalten möglich ist, wurde inzwischen weithin akzeptiert und weltweit arbeiten daran renommierte Forscher wie Masakazu Aono vom Nationalen Institut für Materialwissenschaft in Japan und Rainer Waser vom Forschungszentrum Jülich.

Allen Teams stellt sich ein Problem: Nanocrossbars müssen gezielt angesteuert werden. Das aber besorgt ein Siliziumchip, also eine wesentlich größere Komponente. Um von dessen Mikro- in die Nanowelt zu gelangen, verwenden wir einen »Demultiplexer«. Dieser Schaltkreis erhält als Input eine Binärzahl (wie 1010) und wählt anhand dieser Adresse eine einzelne Leitung aus (siehe Kasten nächste Seite).

In unserem Fall handelt es sich um einen Crossbar, der viele Nanodrähte mit einer deutlich kleineren Zahl konventioneller Leitungen koppelt. Diese Umsetzung nutzt das binäre Zahlensystem: Jedes Bit einer Adresse benötigt eine mikroskopische Leitung, doch mit zum Beispiel vier Leitungen lassen sich insgesamt 16 verschiedene Binärzahlen beziehungsweise Adressen darstellen, also 16 Nanodrähte gezielt ansteuern. Dies ist wichtig, denn die Fertigung von Nanochips lohnt nur, wenn sie sich mit wenigen konventionellen Siliziumschaltkreisen kontrollieren lassen. Allgemein gilt: Ist k die Zahl der konventionellen Leitungen, die in den Demultiplexer münden, sind 2^k Nanodrähte ansteuerbar.

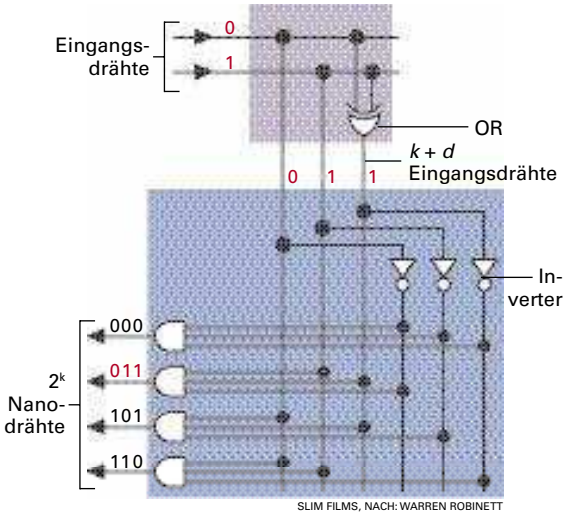
Was aber, wenn eine solche Verbindung defekt ist? Dann sind alle Adressen identisch, die sich nur in dem betreffenden Bit unterscheiden. Wäre das zum Beispiel das letzte einer vierstelligen Adresse, ließen sich die Nanodrähte mit den Hausnummern 0000 und 0001 ebenso wenig gezielt ansteuern wie 1110 und 1111. In der Folge würden auch die von diesen Crossbars kontrollierten Nanoschaltkreise ausfallen. Müssen Demultiplexer also perfekt funktionieren? Da sie zur Hälfte aus Nanokomponenten bestehen, wäre das nicht realistisch. Haben wir versucht, den Teufel mit dem Beelzebub auszutreiben?

Die Lösung des Dilemmas kommt aus einer Nachbardisziplin. Werden digitale Daten mittels Satelliten übertragen, erzeugen Umgebungseinflüsse ein störendes Rauschen. Deshalb zerlegt ein Algorithmus eine Nachricht in Blöcke und er- ▷

IN KÜRZE

- **Um Logik- und Speicherschaltkreise** auf die Größenordnung einiger Nanometer zu verkleinern, sind neue Technologien erforderlich.
- **Große Arrays** sich kreuzender Nanodrähte, so genannte Crossbars, zählen zu den Kandidaten. Allerdings lassen sich strukturelle Defekte bei ihrer Herstellung nicht vermeiden.
- **Solche potenziellen Störquellen** können jedoch durch redundante Auslegung der Schaltkreise kompensiert werden.

Der Demultiplexer



SLIM FILMS, NACH: WARREN ROBINETT

Demultiplexer verbinden eine große Zahl von Nanodrähten mit einer kleineren in Silizium realisierter Steuerleitungen. In dem abgebildeten Fall soll der Nanodraht mit der Adresse »01« angesprochen werden. Dafür reichen eigentlich zwei (k = 2) konventionelle Anschlüsse, doch um Defekten vorzubeugen, wird eine weitere Steuerleitung als Redundanz vorgesehen (d = 1). Aus der Adresse »01« wird dann über eine logische OR-Verknüpfung eine »011« erzeugt. Wäre eine Verbindung zwischen der Mikro- und der Nanowelt defekt, wäre die Adressierung immer noch eindeutig. Insgesamt lassen sich so mit k Steuerleitungen 2^k Nanodrähte beschicken.

▷ weitert einen jeden davon um Extrabits. Deren Inhalt berechnet er aus der Originalnachricht. Geraten einige Bits der so kodierten Nachricht bei der Übertragung durcheinander – Einsen werden zu Nullen und umgekehrt –, lässt sich der ursprüngliche Zustand anhand der Zusatzinformation rekonstruieren, solange der Schaden nicht zu groß ist.

Logikschaltung mit Nanodrähten

Mit Hilfe der HP-Forscher Gadiel Seroussi, Ronnie Roth und Warren Robinett haben wir uns dieses Konzept zu Nutze gemacht und beschicken den Demultiplexer mit zusätzlichen konventionellen Drähten. Indem wir so die Zahl der möglichen Adressen vergrößern, erzeugen wir die notwendige Redundanz. Deren Größe hängt von der Wahrscheinlichkeit ab, mit der solche Defekte in der Produktion auftreten. Ist jede hundertste Verbindung unterbrochen, wäre nur jeder zehntausendste Demultiplexer zu gebrauchen. Erweitert man den Adressraum um rund vierzig Prozent, wäre nur jeder zehntausendste Ausschuss.

Nach der Fertigstellung des ersten 16-Bit-Speichers ist es sowohl dem Heath-Team wie auch uns vor vier Jahren gelungen, 64-Bit-Speicher herzustellen, deren Drähte – vom jeweiligen Mittelpunkt aus gemessen – rund 120 Nanometer voneinander entfernt waren (das in der Halbleiterindustrie gebräuchliche Maß ist die Hälfte dieses Abstands und wird als half-pitch bezeichnet, es betrug 62 Nanometer). 2004 gelang sogar die Fertigung eines 1-Kilobit-Crossbarspeichers mit einem noch einmal halbierten Drahtabstand (zum Vergleich: Der half-pitch eines Halbleiterchips lag 2005 bei 90 Nanometer).

Um eine »1« (niedriger Widerstand) oder eine »0« (hoher Widerstand) zu speichern, legen wir eine Spannung an. Überschreitet sie einen Grenzwert, wechselt der Crossbarschalter seinen Zustand. Diese Schwelle muss freilich recht scharf definiert sein. Auch darf die Steuerspannung nicht zu stark variieren: Fluktuiert sie um mehr als die Hälfte des Grenzwerts, können auch andere Bits als das gewünschte gesetzt oder gelöscht werden.

Zum Lesen der im Schalter gespeicherten Information legten wir eine deutlich niedrigere Spannung an die entsprechende Drahtkreuzung an und maßen den Übergangswiderstand. Bei unserem 64-Bit-Speicher unterschieden sich die »1« und die »0« um mehr als das Hundertfache, ließen sich also sehr gut differenzieren.

Damit scheint der Nanospeicher in Reichweite zu liegen – die Darpa fordert lediglich eine nochmalige Halbierung des half-pitch. Nun können wir uns der nächsten Herausforderung stellen: komplette Schaltkreise in dieser Größenskala zu konstruieren. Zusammen mit Duncan R. Steward von HP haben wir Crossbars so konfiguriert, dass sie die grundlegenden logischen Operationen AND und OR ausführen können. Im ersten Fall muss an beiden Eingangsleitungen ein Signal anliegen, das die Schwellenspannungen übersteigt, dann schaltet das Element auch auf den Ausgang eine hohe Spannung, beim OR reicht bereits ein entsprechender Input aus. Um das für den Baukasten elementarer Logikfunktionen so wichtige NOT in Crossbartechnik zu realisieren, ersannen wir einen Trick. Zu jedem Eingang führen zwei Leitungen, wobei eine invers versorgt wird: Repräsentiert die weiter zu verarbeitende Spannung eine »1«, erhält der inverse Eingang eine »0«. Jeder Crossbar kann sowohl die ursprüngliche Eingabe als auch die dazu komplementäre verarbeiten.

Die Crossbararchitektur ist ideal, mit den im Nanobereich unvermeidlichen Defekten umzugehen. Das macht sie auch zum Wunschkandidaten in Satellitentechnik und Raumfahrt: Dank der eingebauten Redundanz wären solche Schaltkreise weniger anfällig gegen die von kosmischen Strahlen verursachten Defekte. Und schließlich wäre der Übergang zum Quantencomputer fließend, denn Crossbarschalter lassen sich vermutlich auf die Dimension einzelner Atome verkleinern. Der Miniaturisierung elektronischer Schaltkreise sind also bei Weitem noch keine Grenzen gesetzt. ◁

Die Autoren arbeiten im Quantum Science Research (QSR) Programm der Hewlett-Packard-Labors in Palo Alto (Kalifornien). **Philip J. Kuekes** (links) ist Chefentwickler des Programms und forscht auch über Quantencomputer. **Gregory S. Snider** (Mitte) optimiert derzeit die Architektur nanoelektronischer Schaltkreise. Der Festkörperchemiker **R. Stanley Williams** (rechts) leitet das QSR-Programm.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Feynman lectures in computation. Von Richard P. Feynman. Bearbeitet von Tony Hey und Robin W. Allen. Perseus Books Group, 2000

A defect-tolerant computer architecture: opportunities for nanotechnology. Von J. R. Heath et al. in: Science, Bd. 280, S. 1716, Juni 1998

Die International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) findet sich auf der Webseite http://public.itrs.net/

Morphware oder einer für alles

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Wie ein Chamäleon die Farbe, soll ein Morphwarechip seine Funktion verändern. Damit das auch noch in Echtzeit vonstatten geht, setzen Berliner Forscher auf magnetische Schaltkreise.

Von Reinhold Koch

Vielseitig oder schnell, diese Frage stellt sich den Entwicklern von Mikroprozessoren immer wieder. Am einen Ende der Skala rangiert das Herz jedes Computers, der zentrale Prozessor (CPU). Als echte Universalmaschine berechnet er räumliche Bilder, unterstützt Textverarbeitung, löst komplizierte Gleichungssysteme, übernimmt Steuerfunktionen. Diese Vielseitigkeit geht aber auf Kosten der Geschwindigkeit, beruht sie doch auf einem komplizierten System von Befehlsebenen: ganz oben die für den jeweiligen Einsatz nötigen Anweisungen der Software, ganz unten die Steuerbefehle für die Prozessorhardware. Anwendungsspezifische Integrierte Schaltungen, kurz ASICs, sind einfacher strukturiert und deshalb schneller. Sie verstehen nur wenige Steuerbefehle und diese sind »maschinennah«, das heißt auf die konkrete Schaltung zugeschnitten. Auf Sound- oder Grafikkarten verrichten solche Chips ihren Dienst und nehmen der CPU einen Teil der anfallenden Arbeit ab.

Mittlerweile gibt es Hardware, deren logischer Aufbau nicht ein für allemal festliegt, sondern rekonfigurierbar ist. Ein Beispiel solcher »Morphware« sind die bereits kommerziell erhältlichen FPGAs (Field-Programmable Gate Arrays). Sie bestehen aus Modulen, in denen eine Vielzahl von Transistoren so zusammengefasst sind, dass sie gemeinsam bestimmte logische Operationen durchführen können. Die »Verdrahtung« der Module lässt sich programmieren, mithin ihr Zusammenspiel und damit die Schaltungslogik umbauen. In der Praxis haben sich solche FPGAs bereits bewährt: Sie verschlüsseln oder komprimieren Daten und erkennen Objekte in Videoaufnahmen zehn- bis hundertmal schneller als eine herkömmliche CPU.

Solche Morphware basiert aber noch auf der etablierten Siliziumtechnologie CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), das bringt Nachteile mit sich. Vor allem benötigt die Neuverschaltung der logischen Blöcke mehr als zehn Nanosekunden, während der daraus resultierende Prozessor etwa hundertmal schneller arbeitet. Eine Rekonfigurierung innerhalb eines Computertakts ist deshalb nicht möglich. Derselbe Prozessor könnte also nicht ohne Zwischenstopps Satellitenbilder verarbeiten, komprimieren und senden. Zudem sind FPGAs sehr groß, was ihre Anzahl in einem System und damit die Zahl und Geschwindigkeit gleichzeitig ausführbarer logischer Operationen limitiert.

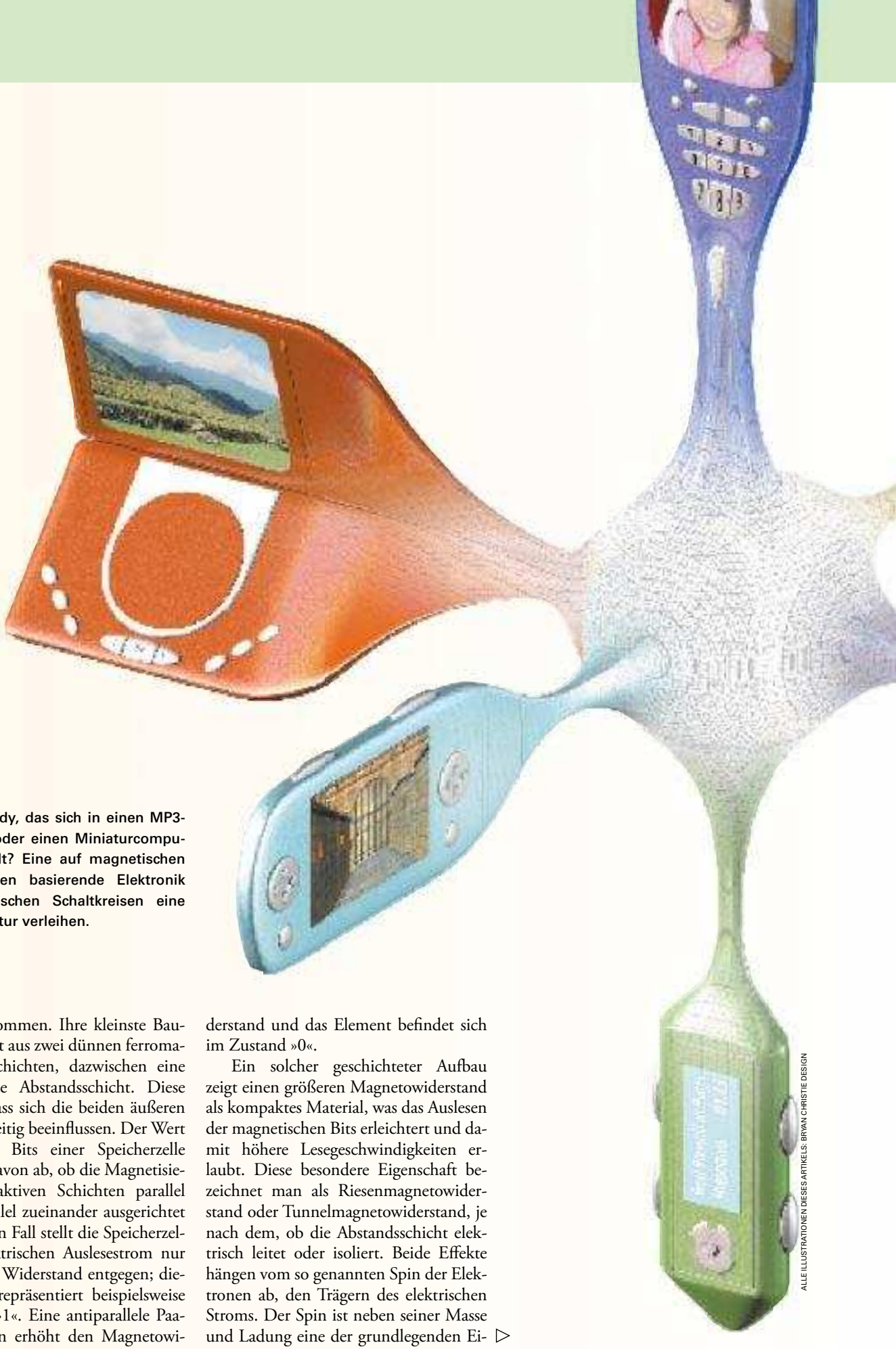
Deshalb entwickeln einige Forschungsgruppen neuerdings Morphware, deren logische Elemente (Gatter, englisch *gates*) aus dünnen magnetischen Schichten bestehen. Da sie nicht einmal eine zehntel Nanosekunde brauchen, um eine andere logische Struktur anzunehmen, ist die Neukonfiguration innerhalb des Prozessortakts kein Traum mehr. Derartige Elemente haben obendrein den Vorteil, dass die berechnete Information gespeichert bleibt, selbst wenn der Rechner ausgeschaltet wird. Im Gegensatz dazu muss sie bei CMOS-Bauteilen während des Betriebs permanent aufgefrischt werden. Magnetologische Komponenten benötigen also weniger Strom. Mehr noch: Weil die berechnete Information erhalten bleibt, steht sie für einen folgenden Verarbeitungsschritt zur Verfügung und muss nicht intern aus einem Speicher erneut geladen werden.

Grundlage dieser famosen Eigenschaften ist die Technologie neuer Datenspeicher, die als MRAM (Magnetic Random-Access Memory) demnächst auf

IN KÜRZE

Magnetlogische Morphware

So genannte Morphwareprozessoren lassen sich mittels einer programmierbaren inneren Verdrahtung für neue Aufgaben optimieren. Alternativ zur Siliziumtechnologie könnten diese Elemente auf einer Magnetologik basieren: **Ausrichten magnetischer Schichten durch Steuerströme** ändert ihren elektrischen Widerstand von niedrig nach hoch und umgekehrt. Dieses Prinzip wird bereits genutzt, um in so genannten MRAMs binäre Daten zu speichern. Mit einer leichten Variation lassen sich aber auch logische Operationen realisieren, wie sie allen Computerberechnungen zu Grunde liegen.



Ein Handy, das sich in einen MP3-Player oder einen Miniaturcomputer verwandelt? Eine auf magnetischen Logikbausteinen basierende Elektronik soll elektronischen Schaltkreisen eine Chamäleonnatur verleihen.

ALLE ILLUSTRATIONEN DIESES ARTIKELS: BRYAN CHRISTIE DESIGN

den Markt kommen. Ihre kleinste Baueinheit besteht aus zwei dünnen ferromagnetischen Schichten, dazwischen eine unmagnetische Abstandsschicht. Diese verhindert, dass sich die beiden äußeren Lagen gegenseitig beeinflussen. Der Wert des digitalen Bits einer Speicherzelle hängt dann davon ab, ob die Magnetisierungen der aktiven Schichten parallel oder antiparallel zueinander ausgerichtet sind. Im ersten Fall stellt die Speicherzelle einem elektrischen Auslesestrom nur einen kleinen Widerstand entgegen; dieser Zustand repräsentiert beispielsweise eine digitale »1«. Eine antiparallele Paarung hingegen erhöht den Magnetowiderstand und das Element befindet sich im Zustand »0«.

Ein solcher geschichteter Aufbau zeigt einen größeren Magnetowiderstand als kompaktes Material, was das Auslesen der magnetischen Bits erleichtert und damit höhere Lesegeschwindigkeiten erlaubt. Diese besondere Eigenschaft bezeichnet man als Riesenmagnetowiderstand oder Tunnelmagnetowiderstand, je nach dem, ob die Abstandsschicht elektrisch leitet oder isoliert. Beide Effekte hängen vom so genannten Spin der Elektronen ab, den Trägern des elektrischen Stroms. Der Spin ist neben seiner Masse und Ladung eine der grundlegenden Ei- ▷

▷ genschaften des Elektrons, vereinfacht gesprochen kann er als eine Rotation um die eigene Achse und damit als Drehmoment verstanden werden. Weil bewegte elektrische Ladungen aber stets ein Magnetfeld erzeugen, geht mit der Rotation auch eine Magnetisierung einher – das Elektron wirkt sozusagen wie ein winziger Stabmagnet. Von der jeweiligen Ausrichtung dieses Stabmagneten (parallel oder antiparallel zur Magnetisierung der zweiten Lage) hängt es nun ab, ob die Strom führenden Elektronen einen kleinen oder großen Widerstand beim Übergang von einer zur anderen magnetischen Schicht verspüren.

Auch beim Schreiben eines Bits spielt der Eigendrehimpuls der Elektronen eine Rolle. Derzeit erfolgt das Ummagnetisieren der Schichten noch über das Magnetfeld eines äußeren Stroms, doch an einer Alternative wird bereits geforscht: Der Spin der Leitungselektronen, die durch das Element fließen, soll zukünftig die Magnetisierung schalten (Spektrum der Wissenschaft, 8/2002, S. 28).

Zusätzlich zu seiner Speicherfunktion lassen sich mit einer MRAM-Zelle auch die elementaren logischen Funktionen realisieren, auf denen alle Rechenschritte in Prozessoren beruhen: Die AND-Operation verknüpft zwei Eingangsdaten so, dass das Resultat nur dann eine »1« ergibt, wenn an beiden Eingängen eine »1« anliegt, das OR hingegen erfordert dazu lediglich eine »1« an einem der beiden Eingänge.

Magnetologische Gatter gab es schon in den frühen 1960er Jahren, sie wurden aber schnell von den aufstrebenden Siliziummikrochips verdrängt. Erst im Jahr 2000 griffen William C. Black, Jr. und Bodhisattva Das von der Iowa State University das Thema in einem wegweisenden Artikel wieder auf. Bereits zwei Jahre später demonstrierte ein Siemens-Forscherteam in Erlangen die Machbarkeit eines rekonfigurierbaren magnetischen Logikelements. Und 2003 veröffentlichte meine Gruppe am Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik in Berlin ein neues und einfacheres Konzept, um verschiedene logische Funktionen mit nur einem solchen Baustein zu realisieren.

Der Aufbau eines magnetologischen Gatters ähnelt dem einer MRAM-Zelle: Zwei magnetische Schichten, getrennt durch eine unmagnetische, haben eine parallele oder antiparallele Magnetisierung und das Ensemble zeigt demgemäß einen niedrigen beziehungsweise hohen Magnetowiderstand. Ein Lesestrom ermittelt dann das Ausgangssignal »1« oder »0«.

Das an unserem Institut entwickelte Design verwendet drei Eingänge – A, B und C – von denen jeder mit einem Strom derselben Größe angesteuert wird. Unser Konzept macht sich zu Nutze, dass am Ausgang eines Magnetowiderstandselements zwar nur zwei verschiedene Werte ausgelesen werden können, nämlich »1« und »0«, das Element bezüglich seiner Magnetisierung aber insgesamt vier verschiedene Anfangszustände einnehmen kann: Weil der Gesamtspin in jeder ferromagnetischen Schicht nach links oder rechts weist, gibt es sowohl zwei parallele als auch zwei antiparallele Kombinationen. Wir haben erkannt, dass jede davon eine andere logische Funktion ermöglicht.

Bei unserem Aufbau beginnt eine logische Operation damit, die Polarität des Gatters in einen dieser vier Anfangzustände zu setzen (siehe Kasten rechts). Zur Ummagnetisierung der oberen Schicht werden die Eingänge A und B mit Strom in derselben Richtung, also positiv oder negativ, beschickt. Kommt Eingang C noch hinzu, wird auch noch die untere Schicht polarisiert.

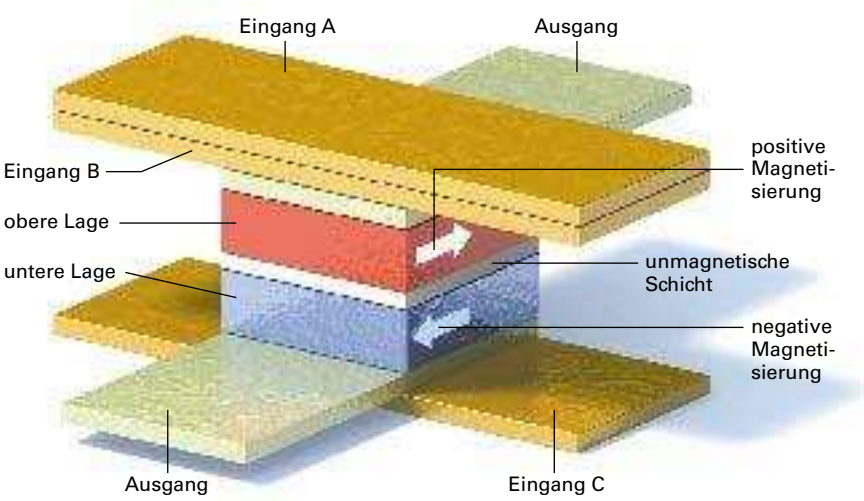
Diesem Setzschritt schließt sich die eigentliche logische Operation an, für die nur die obere Schicht angesteuert werden muss. Der Zwei-Stufen-Prozess hat den Vorteil, dass die logische Funktion des Gatters nach jeder Berechnung neu eingestellt werden kann. Da die zugewiesene Polarität des Ausgangs und damit das aus der Operation resultierende Bit auch nach dem Abschalten des Lesestroms erst einmal erhalten bleibt, entfällt wie erwähnt das periodische Auffrischen; auch das Auslesen kann ohne Löschen und Neuschreiben des Bits erfolgen. Die kombinierte Logik- und Speicherfähigkeit spart daher Energie und Zeit.

Der Vorgang lässt sich besonders gut am Beispiel der AND-Funktion erläutern. Man startet mit einem der beiden antiparallelen Zustände, das heißt dem Ausgangswert »0«. Im Querschnitt betrachtet, zeigt die Magnetisierung der oberen Schicht nach links und die der unteren Schicht nach rechts. Damit der Ausgangswert des Gatters von »0« nach »1« springt, muss die Magnetisierung der oberen Schicht nach rechts gedreht werden. Dazu beschickt man die beiden Eingänge A und B mit einem als »positiv« definierten Strom. Nun sind beide Schichten parallel orientiert und gemäß der Logiktabelle resultiert der Ausgangswert »1«.

Der Programmablauf für ein OR-Gatter verläuft analog, jedoch ist der Anfangszustand beider Schichten nach

Wie funktioniert ein magnetologisches Gatter?

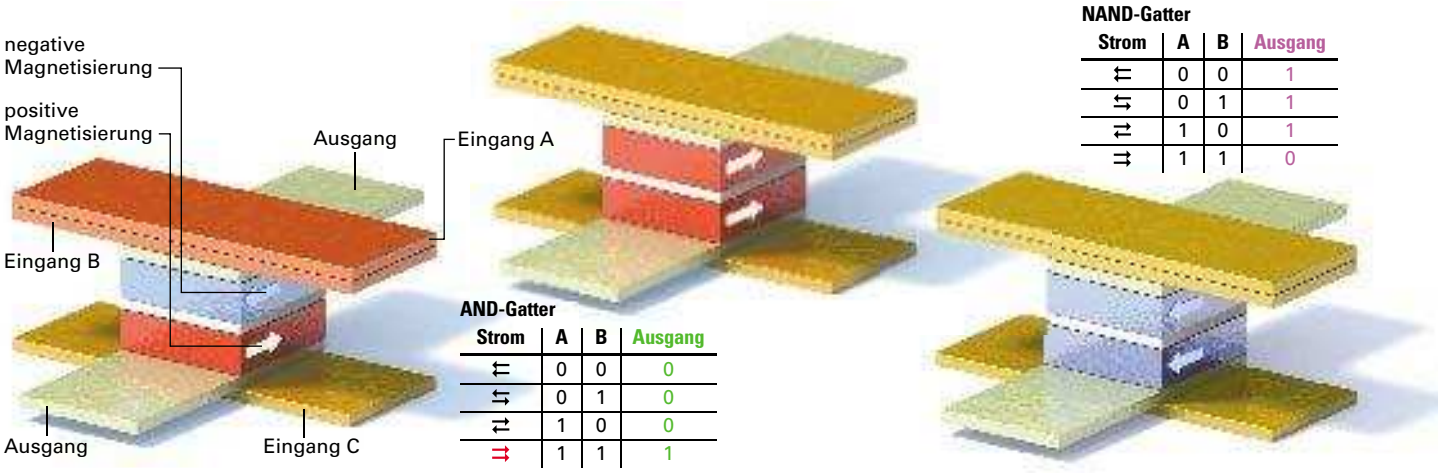
Zwei ferromagnetische Lagen, die durch eine nichtmagnetische Schicht getrennt sind, können ihre Magnetisierungsrichtung verändern, um eine digitale »1« (Pfeil nach rechts) oder »0« (Pfeil nach links) zu repräsentieren. Elektrischer Strom in den Eingangsleitungen erzeugt ein Magnetfeld, das die gewünschte Umschaltung vornimmt. Die beiden oberen Zuleitungen (A und B) – die den Informationseingängen entsprechen – sind dabei für die obere Schicht zuständig. Strom durch alle drei Steuerleitungen kann zudem die Magnetisierung beider Lagen umkehren. Ist diese parallel, wird am Ausgang eine »1« gelesen, bei antiparalleler Ausrichtung eine »0«.



Logische Operationen

Mit einem magnetologischen Gatter erfolgt eine logische Operation in zwei Stufen. Zum Beispiel wird ein AND-Gatter gebildet, indem man das Element zuerst in einen »0«-Zustand setzt, also für eine antiparallele Ausrichtung der Magnetisierungen sorgt (linke Grafik): Die obere Schicht repräsentiert eine »0« (Pfeil nach links), die untere Schicht eine »1« (Pfeil nach rechts). Am Ausgang liegt ein »0« an, wie es die AND-Operation erfordert. Durch die Stromrichtung lassen sich nun weitere logische Verknüpfungen durchführen, doch nur dann, wenn die Ströme in den Eingangsleitungen A und B (rot) die obere Schicht ummagnetisieren, repräsentieren beide ferromagnetischen Schichten eine »1« und das Ausgabebit wechselt gemäß der AND-Verknüpfung von »0« auf »1« (Grafik Mitte).

Durch Ansteuerung der drei Eingangleitungen verwandelt sich ein solches AND-Gatter in sein Gegenstück, das NOT AND- oder kürzer NAND-Element. Dazu werden Ströme, die ein negativ gerichtetes Magnetfeld (blau) erzeugen, an die Eingangsleitungen A, B und C angelegt. Die Magnetisierung der unteren Schicht kehrt sich dabei um (rechtes Gatter). Nun lassen sich NAND-Operationen über die Leitungen A und B ansteuern (C wird nur für den Anfangszustand benötigt und taucht deshalb in der Tabelle nicht auf).



AND-Gatter

Strom	A	B	Ausgang
⇄	0	0	0
⇄	0	1	0
⇄	1	0	0
⇄	1	1	1

NAND-Gatter

Strom	A	B	Ausgang
⇄	0	0	1
⇄	0	1	1
⇄	1	0	1
⇄	1	1	0

rechts magnetisiert; der Output ist also zunächst »1«. Nur ein »negativer« Strom an beiden Eingängen würde die Orientierung der oberen Lage umkehren, also einen insgesamt antiparallelen Zustand mit Ausgangswert »0« erzeugen, ein »positiver« Strom am Eingang A oder B oder an beiden hingegen ließe den Ausgabewert unverändert.

Zwei weitere logische Funktionen ergeben sich, wenn man die Magnetisierung der unteren Schicht auf »links« setzt. Dazu werden alle drei Eingänge – A, B und C – mit einem »negativen« Strom angesteuert. Das Umschalten der unteren Schicht macht aus dem Output »1« eine »0« und umgekehrt. Die AND-Funktion verwandelt sich damit zu ihrem Gegenstück, dem NOT AND (NAND), und das OR zu einem NOT OR (NOR).

OR- und AND-Funktionen entsprechen der Boole'schen Addition beziehungsweise Multiplikation. Zusammen mit NAND und NOR bilden sie eine starke Basis, um selbst die komplexesten Schaltkreise aufzubauen. Durch eine modifizierte Ansteuerung lassen sich überdies noch höherwertigere logische Funktionen realisieren wie das XOR, das zwischen gleichen und entgegengesetzten Eingängen unterscheidet: XOR gibt eine »1« bei gleichen Eingängen (»0«/«0« oder »1«/«1«) aus, eine »0« bei komplementären (»1«/«0« oder »0«/«1«) . Zwei MRAM-Gatter reichen dazu aus, in der CMOS-Technologie sind 14 Transistoren nötig.

XOR ist die wichtigste Komponente eines so genannten Volladdierers und der wiederum ist die am häufigsten benötigte Einheit in einem Prozessor: Er summiert zwei binäre Eingänge sowie den Übertrag einer vorhergehenden Berechnung, das liefert eine neue Summe und einen neuen Übertrag. Ein solches Element lässt sich komplett magnetologisch aufbauen. Dank der Nichtflüchtigkeit und Programmierbarkeit reichen dafür drei Gatter, in CMOS-Technologie sind es mindestens 16 Transistoren. Wir schätzen, dass die magnetische Variante es mit den schnellsten Silizium-Volladdierern aufnehmen kann und dabei deutlich weniger Energie verbraucht.

Die Eingangsleitungen A und B könnten wie bei den MRAMs als Gitter aufgebaut werden, mit den magnetologischen Elementen in den Kreuzungspunkten: Erhalten beide Zuführungen gleichzeitig ein Steuersignal, schaltet das jeweilige Element. Eine Matrix von CMOS-Transistoren würde als Interface fungieren und die Nachverstärkung der für die Weiterverarbeitung zu kleinen Leseströme übernehmen.

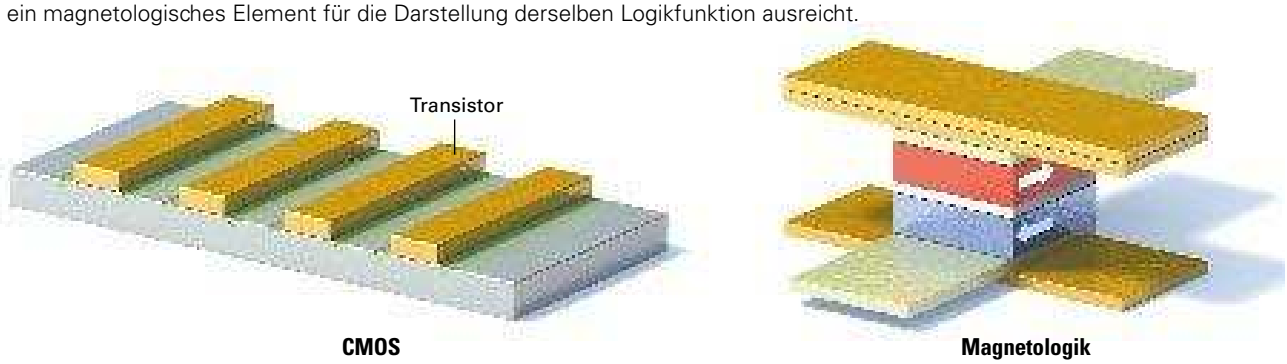
Die Chamäleonnatur eines Morphwareprozessors verspricht viele Vorteile. Auf Grund der Reprogrammierbarkeit seiner Gatter wäre der Einsatzbereich nicht länger durch die Hardware vorherbestimmt. In CMOS wird die Logik eines normalen Transistorgatters durch die Verdrahtung definiert und fixiert. Ein magnetologischer Prozessor hingegen stellt nur einen quasi universellen Block aus logischen Gattern bereit, von denen jedes individuell für die gewünschte Anwendung programmiert werden kann.

Ein solcher Prozessor kommt mit viel weniger logischen Gattern aus als sein CMOS-Kollege, weil dieser immer nur wenige Prozent davon für eine Aufgabe einsetzen kann. Erfordert eine Berechnung etwa besonders oft die Funktion eines Volladdierers, kann sich die Magne- ▷

Wählen Sie Ihren Prozessor

	programmierbar	Geschwindigkeit der Reprogrammierbarkeit	Anzahl der Komponenten für elementare Logikfunktionen	Timing
Magnetologik	ja	~0.1 Nanosekunden	ein Gatter	paralleler Betrieb, gegebenenfalls auch ohne Uhr zur Synchronisation des Datentransfers
Herkömmlicher Prozessor	nein	nicht zutreffend	vier Transistoren	serieller, getakteter Betrieb
FPGAs	ja	>10 Nanosekunden	individuelle Adressierung der Logikelemente nicht möglich	serieller, getakteter Betrieb

Zum Aufbau eines AND-Schaltkreises werden vier Transistoren benötigt (links), während bereits ein magnetologisches Element für die Darstellung derselben Logikfunktion ausreicht.



▷ tomorphware immer wieder entsprechend neu konfigurieren, während die Kalkulation in der herkömmlichen Maschine stockt. Die Flexibilität der Gatter bedeutet auch, dass neue Software leicht implementierbar ist.

Da die Schaltgeschwindigkeit wie bei CMOS-Chips Milliarden Zyklen pro Sekunde beträgt, vermag ein Chamäleonprozessor seine Funktion viele Male innerhalb einer Sekunde zu wechseln. Dank der Nichtflüchtigkeit der berechneten Bits müssen sie nicht zeit- und energieaufwändig vom Prozessor in den Speicher und zurück befördert werden. Das ermöglicht effizientere Algorithmen und Arbeitsprozesse – die Leistungsfähigkeit der Prozessoren wächst auch ohne die in der Siliziumtechnologie dazu nötige Miniaturisierung.

Dank der großen Ähnlichkeit zum MRAM kann die Magnetologik vorerst von dessen Entwicklung profitieren. So muss in beiden Bauelementen das magnetische Übersprechen zwischen den Ferromagnetika unterbunden werden. Zunächst könnte also ein MRAM-Chip als Prozessor fungieren, der – weil nur eine seiner beiden Schichten schaltbar ist – AND und OR beziehungsweise NAND und NOR realisieren kann. Deshalb hoffen wir, dass die Industrie die Entwicklung dieser Speicherzellen vorantreibt. Leider geht sie dies eher zögerlich an – mit neuen Speichertechnologien lässt sich derzeit wenig verdienen.

Um jedoch das volle Potenzial eines magnetischen Prozessors auszuschöpfen, müssen diverse Probleme gelöst werden. Derzeit gelingt es weder uns noch Kollegen in anderen Einrichtungen, die beiden magnetischen Lagen unabhängig voneinander zu schalten. Da ein magnetischer Prozessor auf Grund seiner Flexibilität wohl die meiste Zeit unter Volllast arbeiten wird, entwickelt er zudem sehr viel mehr Wärme als sein Siliziumpendant, was die Haltbarkeit beeinträchtigt. Den Ingenieuren muss es gelingen, für magnetologische Gatter eine Lebensdauer von 10^{16} bis 10^{17} Schaltzyklen zu erreichen – das Hundert- bis Tausendfache der bislang erreichten Werte. Bis dahin mag es helfen, dass defekte Gatter während des Hochfahrens eines Computers entdeckt und überbrückt werden. Zur Optimierung einer Magnetologik suchen wir noch Materialien mit höherem Magnetowiderstand, die sich zudem mit Halbleitern kombinieren lassen (Spektrum der Wissenschaft 11/2004, S. 76). Die größte Hürde aber dürfte es sein, eine geeignete Compilersprache zu entwickeln und neue Algorithmen zu finden, die alle Vorteile der in Echtzeit reprogrammierbaren logischen Gatter ausnutzen. ◀

Der Chemiker **Reinhold Koch** leitet die Forschergruppe Nanoakustik am Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik in Berlin. Dort habilitierte er 1993 an der Freien Universität. 1994 erhielt er den Karl-Scheel-Preis für seine Arbeiten auf dem Gebiet der mechanischen Spannungen in dünnen Schichten sowie Strukturuntersuchungen mit einem Rastertunnelmikroskop.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Programmable computing with a single magnetoresistive element. Von A. Ney, C. Pampuch, R. Koch und K. H. Ploog in: Nature, Bd. 425, S. 485, 2. Oktober 2003

The future of universal memory. Von Russel Cowburn in: Materials Today, Bd. 1, Heft 7–8, S. 32, Juli–August 2003

Reconfigurable computing: a survey of systems and software. Von Katherine Compton und Scott Hauck in: ACM Computing Surveys, Bd. 34, Heft 2, S. 171, 2002

Programmable logic using giant-magnetoresistance and spin-dependent tunneling devices. Von W. C. Black, Jr. und B. J. Das in: Journal of Applied Physics, Bd. 87, Heft 90, S. 6674, 1. Mai 2000

Können wir das Klimaproblem begraben?

Statt das Treibhausgas Kohlendioxid, das bei der Verbrennung fossiler Energieträger entsteht, einfach in die Luft zu blasen, könnte man es in die Erde pumpen, um eine Erwärmung der Atmosphäre zu vermeiden. Wie realistisch und sinnvoll ist diese Option?

Von Robert H. Socolow

Wenn seinerzeit William Shakespeare einen Atemzug nahm, bestanden von einer Million Molekülen, die in seine Lungen eindrangen, 280 aus Kohlendioxid (CO_2). Heute hat das CO_2 in der Luft einen Anteil von 380 Molekülen pro Million. Und jedes Jahr werden es zwei mehr.

Niemand weiß genau, welche Folgen dieser rasante Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration hat und was auf uns zukommt, wenn in den nächsten Jahrzehnten immer größere Mengen des Treibhausgases, das wie eine Wolldecke die Erdoberfläche warm hält, in die Luft gelangen. Wir machen mit unserem Planeten ein unkontrolliertes Experiment. Weil das Kohlendioxid die Atmosphäre aufheizt, schmelzen die Gletscher, was den Meeresspiegel steigen lässt. Außerdem wird, da die Ozeane einen Teil des CO_2 absorbieren, das Meerwasser saurer.

Unklar ist jedoch, wie sich im Einzelnen das Klima verändert, wie schnell der Meeresspiegel steigt und welche Folgen die Versauerung der Ozeane hat. Niemand weiß auch mit Sicherheit, welche terrestrischen und marinen Ökosysteme besonders empfindlich auf diese Entwicklung reagieren werden und welche Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden von uns Menschen zu erwarten sind. Momentan treiben wir den Klimawandel schneller voran, als wir herausfinden können, was er anrichtet.

Wenn sich der CO_2-Anstieg mühelos bremsen ließe, würde die Menschheit das tun. Wäre er unabänderlich, müssten wir versuchen, uns auf die Folgen einzustellen. Die Realität liegt jedoch irgendwo dazwischen. Die Aufgabe lässt sich zwar mit vorhandenen Mitteln bewältigen, aber die erforderlichen Maßnahmen sind kompliziert, teuer und umstritten.

Damit wir die Gefahr künftiger Umweltschäden durch die globale Erwärmung verringern, sollte es in jedem Fall ein hochrangiges weltweites Ziel sein, den Kohlendioxidausstoß zu drosseln. Wir müssen alles daransetzen, Energie effizienter zu nutzen und die fossilen Brennstoffe – die Hauptquellen anthropogener CO_2-Emissionen – durch erneuerbare Energieträger oder Kernkraft zu ersetzen.

Außerdem aber könnten wir eine Maßnahme ergreifen, die zunehmend in den Blickpunkt rückt: Kohlendioxid abtrennen und es in der Tiefe speichern, anstatt es in die Atmosphäre entweichen zu lassen. Warum muss CO_2 in die Luft geblasen werden? Die Atmosphäre dient uns immer noch als wichtigste Mülldeponie, ist doch der Ausstoß von Abgasen durch Schornsteine und Auspuffe die einfachste und – zumindest vordergründig – billigste Art der Entsorgung. Doch das ließe – und sollte – sich ändern. Die Verfahren zur Abtrennung und Speicherung von Kohlendioxid gibt es bereits, und die Hindernisse auf dem Weg zu ihrem praktischen Einsatz scheinen überwindbar.

Bei der Verbrennung fossiler Energieträger – Kohle, Erdöl und Erdgas – entstehen große Mengen an Kohlendioxid. Grundsätzlich könnte man überall dort, wo eine solche Verbrennung stattfindet, Vorrichtungen zur Abscheidung dieses Gases installieren. Doch eignen sich einige Stellen besser dazu als andere.

Wenn Sie ein Auto besitzen, das durchschnittlich 7,8 Liter auf 100 Kilometer verbraucht, und damit in einem Jahr 16 000 Kilometer fahren, müssen Sie insgesamt 1250 Liter – etwa eine Tonne – Benzin tanken. Aus dem Auspuff entweichen dann rund drei Tonnen Kohlendioxid. Zwar wäre es denkbar, das

IN KÜRZE

- Das **Abtrennen des Kohlendioxids aus den Abgasen** von Kraftwerken und seine anschließende Speicherung in tiefen Gesteinsschichten könnte einen großen Beitrag dazu leisten, die globale Erwärmung zu bremsen.
- Die **dafür nötigen Techniken** stehen zur Verfügung, müssen aber noch optimiert werden – vor allem, was die Kosten angeht. Außerdem gilt es, Erfahrungen zu sammeln, wie sich am besten verhindern lässt, dass das Gas allmählich oder plötzlich aus dem Gesteinsspeicher entweicht.
- Derzeit gibt es **finanziell tragbare Einstiegsmöglichkeiten**. So lässt sich die Ölförderung aus weit gehend erschöpften Lagerstätten durch das Einpressen von Kohlendioxid steigern. Dabei können Ingenieure das Verfahren erproben und Fragen zur Sicherheit klären.

Gas im Auto aufzufangen und zur Tankstelle zurückzubringen. Doch gibt es dafür noch keine praktikable Methode. Den CO_2-Ausstoß eines stationären Kohlekraftwerks abzuscheiden, ist dagegen wesentlich einfacher.

Deshalb konzentrieren sich die heutigen Bemühungen um die Abtrennung und Speicherung von Kohlendioxid auf derartige Anlagen, von denen immerhin ein Viertel der weltweiten Kohlendioxidemissionen stammt. Ein neues, großes Kohlekraftwerk mit einer Leistung von tausend Megawatt setzt pro Jahr 6 Millionen Tonnen CO_2 frei. Das entspricht den Abgasen von 2 Millionen Autos. Weltweit könnte sich der Gesamtausstoß an Kohlendioxid in den nächsten Jahrzehnten verdoppeln, wenn die USA, China, Indien und viele andere Länder ihren Kraftwerkpark aufstocken und erneuern (siehe Grafik auf S. 74). Neue Kohlekraftwerke, die in den kommenden 25 Jahren ans Netz gehen, ließen sich allerdings so konstruieren, dass sie das Kohlendioxid abtrennen, das ansonsten durch die Schornsteine entweichen würde.

Möglichkeiten zur CO_2-Abtrennung

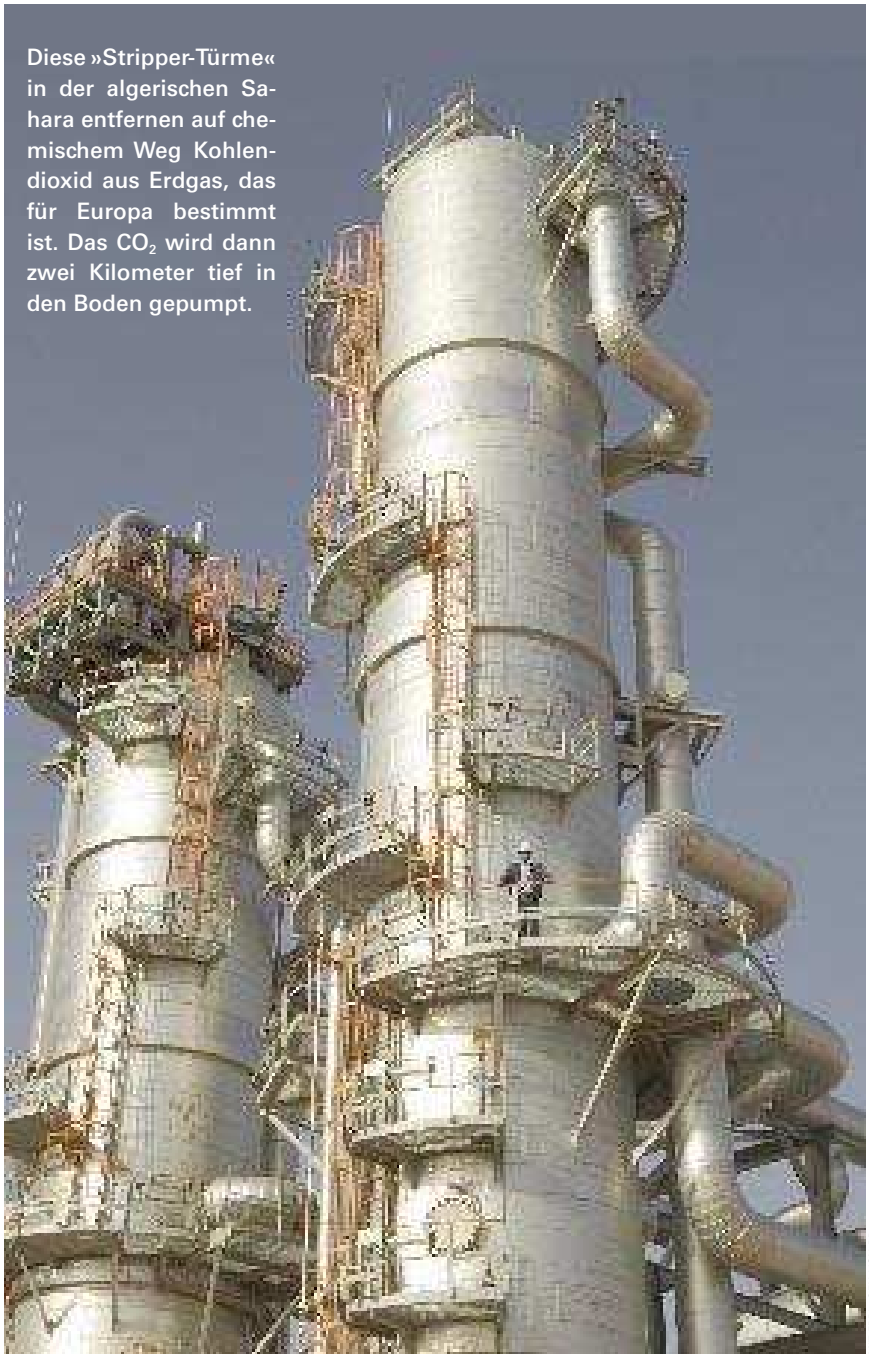
Ein Stromversorgungsunternehmen, das in ein neues Kohlekraftwerk investieren will, hat heute die Wahl zwischen zwei Basistypen. Ein dritter befindet sich in Entwicklung, ist aber noch nicht verfügbar. Alle drei Anlagenarten lassen sich für die Abtrennung von Kohlendioxid ausrüsten.

Konventionelle Kohlekraftwerke verbrennen die Kohle vollständig in einem Schritt: Die freigesetzte Wärme verwandelt Wasser in komprimierten Dampf, und dieser treibt eine Turbine an, die Strom erzeugt. Bei der Standardversion – dem Routinetyp im 20. Jahrhundert – verlässt nach der Abscheidung von Schwefel ein Abgasgemisch unter Atmosphärendruck einen hohen Schornstein.

Hauptsächlich enthalten die Abgase Stickstoff und Wasserdampf. Kohlendioxid macht nur etwa 15 Prozent aus. Um es abzutrennen, könnte man den Schornstein durch einen Waschturm ersetzen, in dem das Rauchgas in Kontakt mit Tröpfchen organischer Stickstoffverbindungen – so genannter Amine – käme, die Kohlendioxid selektiv absorbieren. In einem zweiten Turm, dem Stripper (Abscheider), würde die Aminlösung erhitzt. Dabei gäbe sie konzentriertes CO_2 ab, und der chemische Absorber wäre regeneriert.

Ein alternatives System zur Verstromung von Kohle ist als Kombikraftwerk mit integrierter Kohlevergasung (IGCC, *Integrated Gasification Combined Cycle*) bekannt. Dabei reagiert die Kohle zunächst in einer Vergaserkammer mit einem Unterschuss an Sauerstoff zu Kohlenmonoxid. Dieses wird nach dem Entfernen der Schwefelverbindungen und anderer Verunreinigungen in Luft verbrannt und treibt dabei eine Gasturbine – ein abgewandeltes Flugzeugtriebwerk – an. Deren heiße Abgase verwandeln danach noch Wasser in Dampf, der in einer Dampfturbine zusätzlichen Strom erzeugt, und entweichen schließlich durch einen Schornstein.

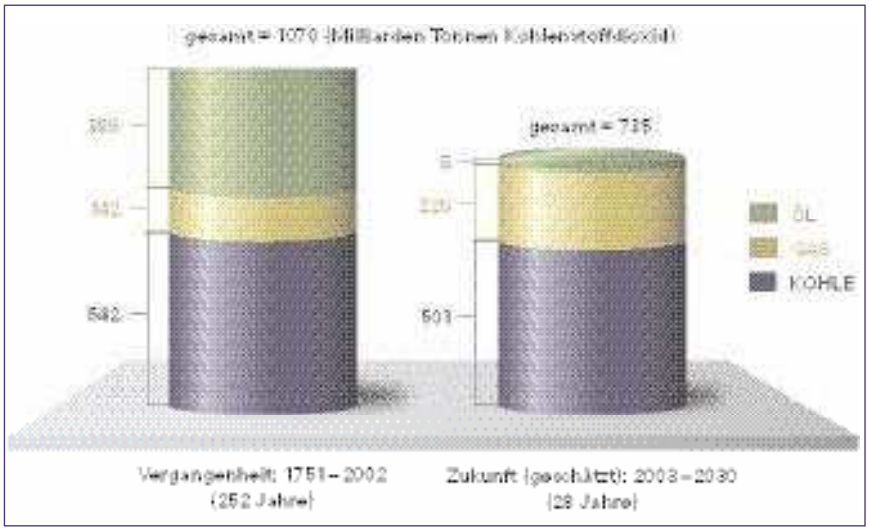
Um in einer solchen Anlage CO_2 abzutrennen, könnten die Techniker dem in der Vergaserkammer erzeugten Kohlenmonoxid Wasserdampf hinzufügen, der es in einer so genannten Shift-Reaktion großenteils in Wasserstoff und Kohlendioxid umsetzen würde. Letzteres ließe sich dann zusammen mit den Schwefelverbindungen und anderen Verunreinigungen ausfiltern. Das Restgas, jetzt vorwiegend Wasserstoff, würde in Luft verbrannt, um in einer Gas- und danach in einer Dampfturbine Strom zu erzeugen. ▷



Diese »Stripper-Türme« in der algerischen Sahara entfernen auf chemischem Weg Kohlendioxid aus Erdgas, das für Europa bestimmt ist. Das CO_2 wird dann zwei Kilometer tief in den Boden gepumpt.

MIT FRDL. GEN. VON BP

ALISON KENDALL, NACH: DAVID HAWKINS, NATIONAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL; DATEN: GREGG MARLAND, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY



Die fossil befeuerten Kraftwerke, deren Bau nach Informationen der Internationalen Energiebehörde für die nächsten 25 Jahre geplant ist (rechts), werden während ihrer Betriebszeit Kohlendioxid in einer Menge freisetzen, die fast so hoch ist wie sämtliche Emissionen dieses Treibhausgases in den vergangenen 250 Jahren (links). Bei dem Vergleich wurde für Kohlekraftwerke eine Lebensdauer von 60, für Gaskraftwerke eine von 40 Jahren angesetzt.

▷ Bei der dritten Option zur Energieerzeugung aus Kohle, dem Oxyfuel-Verfahren, fände die gesamte Verbrennung in reinem Sauerstoff statt. Das könnte in einem Schritt geschehen – analog zu konventionellen Kohlekraftwerken. Anders als bei diesen enthielte das Abgas aber keinen Stickstoff, sondern nur CO_2 und etwas Wasserdampf, die leicht voneinander zu trennen sind. In einer alternativen Version, die sich an das IGCC-Verfahren anlehnt, würde das Kohlenmonoxid aus dem Vergaser in eine Gasturbine geleitet und dort mit Sauerstoff verbrannt – unter Umgehung der Shift-Reaktion. Wieder fiele nur CO_2 und etwas Wasserdampf an. Es gibt jedoch noch keine Werkstoffe, die den höheren Temperaturen standhalten, die bei der Verbrennung in reinem Sauerstoff anstatt in Luft auftreten. Ingenieure arbeiten deshalb derzeit an Verfahren, durch Rückführung der Abgase die Temperatur zu senken.

Unabhängig vom Kraftwerkstyp ist die CO_2-Abtrennung mit erhöhtem Aufwand und zusätzlichen Kosten verbunden. Außerdem verringert sich der Wirkungsgrad. Für die gleiche Strommenge muss also mehr Kohle abgebaut und verbrannt werden. Diese Nachteile ließen sich teilweise ausgleichen, wenn es gelänge, mit dem CO_2 zugleich die Schwefelgase abzutrennen und beide gemeinsam unter Tage zu deponieren. Dadurch würde ein Teil der beträchtlichen Ausgaben für die Entschwefelung vermieden.

Die Energieversorger wollen die Profite über die gesamte Laufzeit eines Kraftwerks maximieren, also für einen Zeitraum von sechzig Jahren und mehr. Deshalb müssen sie bei der Kostenberechnung nicht nur die heutigen Umweltgesetze berücksichtigen, sondern auch zu erwartende künftige Regelungen.

Die Frage der Kosten

Die Manager wissen, dass die CO_2-Abtrennung bei einem Kombikraftwerk erheblich weniger Kosten verursacht als bei einem herkömmlichen Dampfkraftwerk; denn das Gas wird in diesem Fall unter hohem Druck abgeschieden, wofür eine kleinere und damit billigere Apparatur genügt. Andererseits sind erst wenige IGCC-Demonstrationskraftwerke in Betrieb, weshalb ein Unternehmen, das sich für die Kohlevergasung entscheidet, in zusätzliche Backup-Ausrüstung investieren muss, um die Betriebssicherheit zu garantieren. Glaubt das Management also, dass die gesetzliche Vorschrift zur CO_2-Abtrennung kurz bevorsteht, wird es sich vielleicht für ein IGCC-Kraftwerk entscheiden. Erwartet es dagegen, erst spät im Lebenszyklus seiner neuen Anlage für Kohlendioxid-Emissionen zahlen zu müssen, wird es höchstwahrscheinlich ein konventionelles Modell vorziehen.

Was bedeuten die zusätzlichen Ausgaben für die Abtrennung und Speicherung von CO_2 für Energieerzeuger und Verbraucher? Nach Schätzungen von Experten dürften sie bei einem IGCC-Kraftwerk etwa 20 Euro pro Tonne Kohlendioxid betragen, während sie bei einem konventionellen Kohlekraftwerk vermutlich doppelt so hoch lägen. In beiden Fällen könnten sich durch technische Fortschritte die Kosten verringern.

Der Kohleproduzent, der Kraftwerksbetreiber und der Stromkunde werden die 20 Euro sehr unterschiedlich wahrnehmen. Müsste der Kohleproduzent dafür aufkommen, würde sich für ihn die Tonne Kohle um rund 50 Euro verteuern – auf etwa das Dreifache des bisherigen Betrags. Für den Betreiber eines neuen Kohlekraftwerks stiegen die Kosten für den Strom, den seine Anlage ins Netz einspeist, dagegen lediglich um 50 Prozent. In den USA kämen damit zu den Basiskosten von rund 0,04 Dollar pro Kilowattstunde 0,02 Dollar hinzu. Ein Endverbraucher, der nur aus Kohle erzeugten Strom kauft und derzeit in den Vereinigten Staaten im Durchschnitt rund 0,10 Dollar pro Kilowattstunde bezahlt, hätte mit 20 Prozent höheren Stromkosten zu rechnen – unveränderte Gebühren für Transport und Verteilung vorausgesetzt.

Allerdings muss man nicht erst den Bau neuer Kohlekraftwerke abwarten, um mit der Abtrennung und Speicherung von Kohlendioxid zu beginnen. Für den Einstieg in die Technologie eignen sich bereits existierende Einrichtungen, die Wasserstoff für die Industrie produzieren oder Erdgas (Methan) für Heizzwecke oder zur Stromerzeugung reinigen. In diesen Anlagen fällt CO_2 in ziemlich reiner, konzentrierter Form an. So wird es bei der industriellen Herstellung von Wasserstoff in Ölraffinerien und Ammoniakfabriken aus einem stark komprimierten Gemisch mit Wasserstoff abgeschieden – und dann derzeit noch in die Luft geblasen. Außerdem muss man, bevor man Erdgas in Flüssiggas-Tankschiffe füllen kann, das enthaltene CO_2 entfernen, weil es in der Kälte zu Trockeneis erstarren und die Rohre verstopfen würde. Auch darf kein Methan ins Erdgasverteilungsnetz eingespeist werden, das mehr als drei Prozent Kohlendioxid enthält.

Erste Projekte zum Speichern des abgetrennten CO_2 sind bereits im Planungsstadium oder – wie in der algeri- ▷

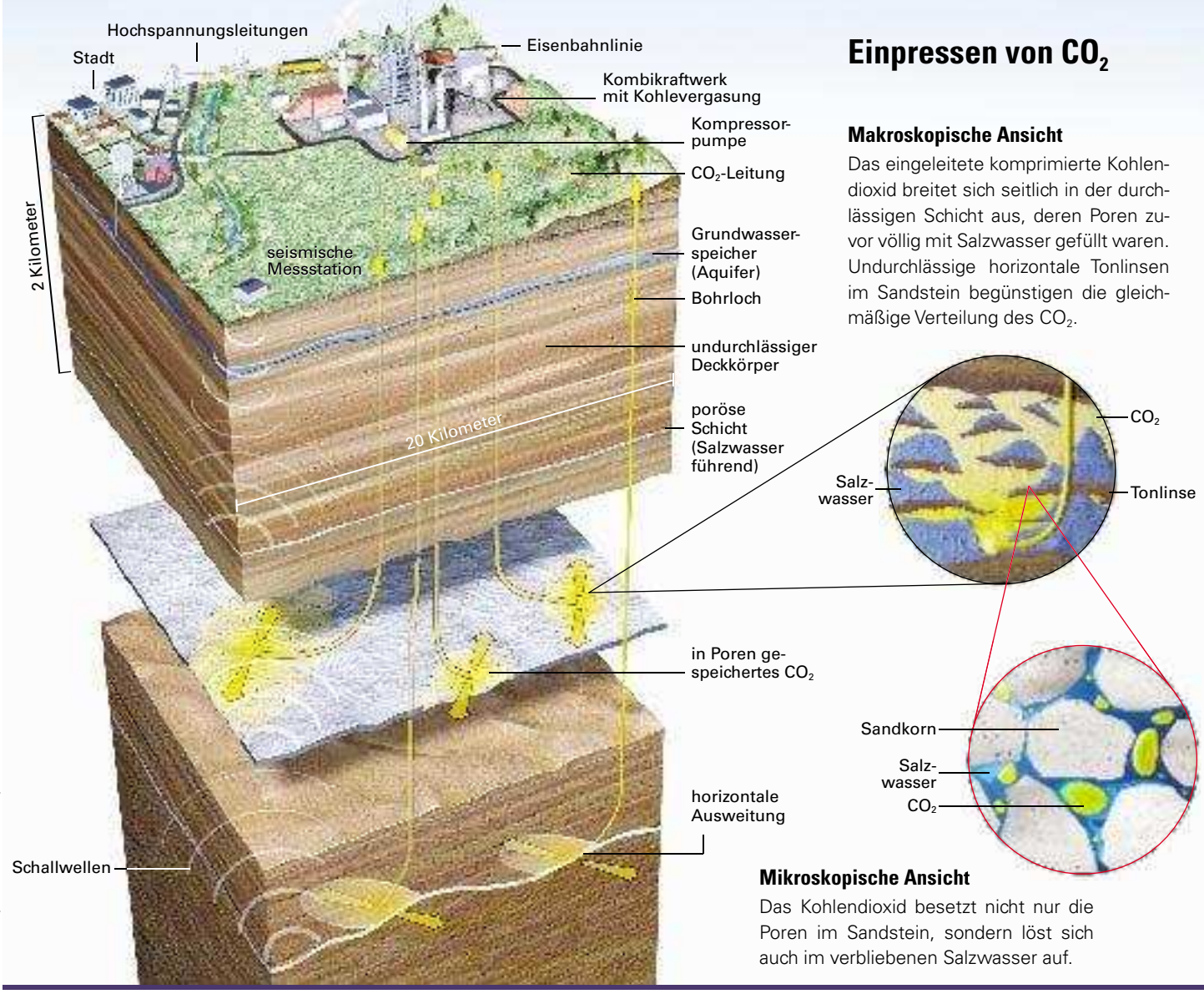
Das Kohlekraftwerk der Zukunft

Betrachten wir eine hypothetische Stadt in der Nähe eines künftigen Kohlekraftwerks mit 1000 Megawatt Leistung, das nun schon zehn Jahre lang Kohlendioxid abgetrennt und unterirdisch deponiert hat. Das Trinkwasser stammt aus einem oberflächennahen Aquifer, der keinen Kontakt zu der viel tiefer gelegenen CO_2-Speicherschicht hat. Die Eisenbahn transportiert Kohle zum Kraftwerk, und Starkstromleitungen verteilen die von ihm erzeugte Elektrizität.

Etwa 60 Millionen Tonnen Kohlendioxid wurden inzwischen abgetrennt und deponiert. Das Gas lagert jetzt in sehr großen, porösen, pfannkuchenförmigen Gesteinsschichten in der Tiefe. Es wurde durch gebogene, am Schluss horizontal verlaufende Bohrlöcher in zwei Salzwasserleiter gepumpt, die sich mehr als 1500 Meter tief unter undurchlässigen Deckkörpern befinden. Bei dem dort herrschenden hohen Druck nimmt das CO_2 einen »überkritischen« Zustand an, in dem es siebzig Prozent der Dichte von Wasser erreicht. Es füllt demnach einen Raum von fast 90 Millionen Kubikmetern.

In beiden Salzwasserleitern machen die Poren zehn Prozent des Volumens aus. Ein Drittel davon sind mit CO_2 gefüllt (siehe eingeklinkte Ausschnittvergrößerungen der porösen Schichten). In diesem Fall wurden 65 Prozent des Gases in die vierzig Meter mächtige obere und 35 Prozent in die nur halb so dicke untere Formation gepumpt. Insgesamt hat der mit überkritischem Kohlendioxid durchtränkte Bereich porösen Gesteins eine horizontale Ausdehnung von etwa 40 Quadratkilometern.

Von einer seismischen Messstation aus »durchleuchten« Techniker mit Schallwellen den Untergrund und verfolgen so die Wanderung des CO_2. Dabei dürften während der ersten zehn Betriebsjahre des Kraftwerks viele aufschlussreiche Informationen über die örtliche Geologie angefallen sein. Mit ihrer Hilfe lässt sich dann entscheiden, ob die Emissionen des Kraftwerks weiterhin in dieselben Löcher gepumpt werden können, ob zusätzliche Bohrungen in dieselben Schichten erforderlich sind oder ob gar ein Wechsel zu anderen Gesteinsschichten geboten scheint.



Einpressen von CO_2

Makroskopische Ansicht

Das eingeleitete komprimierte Kohlendioxid breitet sich seitlich in der durchlässigen Schicht aus, deren Poren zuvor völlig mit Salzwasser gefüllt waren. Undurchlässige horizontale Tonlinsen im Sandstein begünstigen die gleichmäßige Verteilung des CO_2.

Mikroskopische Ansicht

Das Kohlendioxid besetzt nicht nur die Poren im Sandstein, sondern löst sich auch im verbliebenen Salzwasser auf.

DAVID FIERSTEIN, NACH: JULIO FRIEDMANN, LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORIES

▷ schen Sahara – sogar schon angelaufen. Wasserstoffproduktion und Erdgasreinigung bilden damit Meilensteine auf dem Weg zum Abfangen des Treibhausgases auch in Kraftwerken. Allerdings werden in den beiden Industriezweigen weltweit nur etwa fünf Prozent dessen an Kohlendioxid erzeugt, was bei der Stromerzeugung anfällt.

CO_2-neutrale Kohleverflüssigung

Da die Nachfrage nach Erdöl dramatisch wächst und der Preis entsprechend steigt, wollen einige Nationen wie China durch Verflüssigung von Kohle synthetischen Kraftstoff für Fahrzeuge herstellen. Mit Blick auf das Weltklima ist dies zwar ein Rückschritt. Bei der Verflüssigung von Kohle gelangt nämlich nur etwa die Hälfte des enthaltenen Kohlenstoffs in den Kraftstoff. Die andere Hälfte wird von der Fabrik in Form von CO_2 emittiert. Dient ein solcher synthetischer Kraftstoff zum Antrieb von Automobilen, gelangt deshalb insgesamt etwa das Doppelte an Kohlendioxid in die Atmosphäre wie bei der Verbrennung von Benzin. Das Abtrennen und Speichern des CO_2 in der Anlage zur Kohleverflüssigung würde diesen Nachteil für das Klima jedoch ausgleichen. Irgendwann in Zukunft könnten Autos sogar völlig emissionsfrei mit Strom oder Wasserstoff fahren, der in Kraftwerken, die das Kohlendioxid auffangen und deponieren, aus Kohle gewonnen wird.

Strom lässt sich allerdings auch aus Biomasse erzeugen: Material pflanzlicher Herkunft wie Feldfrüchte und ihre Rückstände, Holz, Abfälle der Papierindustrie oder Deponiegas. Wenn die fossilen Brennstoffe, die bei Ernte und Verarbeitung verbraucht werden, unberücksichtigt bleiben, hat die Stromerzeugung aus Biomasse eine ausgeglichene Kohlenstoffbilanz; denn die Menge an Kohlendioxid, die ein konventionelles Biomassekraftwerk freisetzt, entspricht derjenigen, die der Atmosphäre beim Pflanzenwachstum durch die Photosynthese entzogen wurde.

Doch es geht noch besser: Wenn man die Stromerzeugung aus Biomasse mit der CO_2-Abtrennung kombiniert und die pflanzlichen Kulturen nach der Ernte erneuert, wird im Endeffekt Kohlendioxid aus der Luft entfernt. Leider sind dieser Möglichkeit durch die geringe Effizienz der Photosynthese Grenzen gesetzt; zudem brauchen Bäume und Feldfrüchte viel Land zum Wachsen. Vielleicht ließe sich mit neuen Technologien in Zukunft aber auch CO_2 direkt aus der Luft abscheiden, indem man sie zum Beispiel über einen chemischen Absorber strömen lässt.

Mit dem Abfangen des Kohlendioxids ist natürlich nur die Hälfte der Arbeit getan. Wenn ein Elektrizitätsversorgungsunternehmen ein 1000-Megawatt-Kohlekraftwerk errichtet, das für die CO_2-Abtrennung ausgerüstet ist, muss es die jährlich anfallenden sechs Millionen Tonnen Gas während der gesamten Laufzeit der Anlage irgendwo sicher deponieren. Am besten eignen sich für die Speicherung nach Ansicht vieler Forscher tiefe Sedimentgesteinsschichten, deren Poren jetzt mit Salzwasser gefüllt sind. Sie müssten in der Regel weit unterhalb jeglicher Trinkwasserquelle liegen, mindestens 800 Meter tief. Dort ist der Druck achtzigmal so hoch wie in der Atmosphäre. Dadurch gerät das eingepresste CO_2 in einen überkritischen Zustand, in dem es fast so dicht ist wie das Salzwasser, das es in den Gesteinsschichten ersetzt.

Die in die Tiefe geleitete Kohlendioxidmenge kann in Barrel ausgedrückt werden, der Standard-Volumeneinheit der Erdölindustrie, die etwa 159 Litern entspricht. In einem 1000-Megawatt-Kohlekraftwerk würden jährlich rund 50 Millionen Barrel überkritisches Kohlen-

Im Krechba-Ölfeld in Algerien ermittelten die Ingenieure zunächst mit seismischen Verfahren mögliche Speicherschichten für Kohlendioxid. Während der Bohrung maßen sie dann mit einer Elektrosonde im Loch die Porosität der Wand bis zu einer Tiefe von einigen Zentimetern, um die Bereiche mit den meisten Hohlräumen zu finden und den Bohrmeißel dorthin zu lenken. Die Porosität der zwanzig Meter mächtigen Speicherschicht steigt von blau nach rot.

Alternative Entsorgungspläne für CO_2

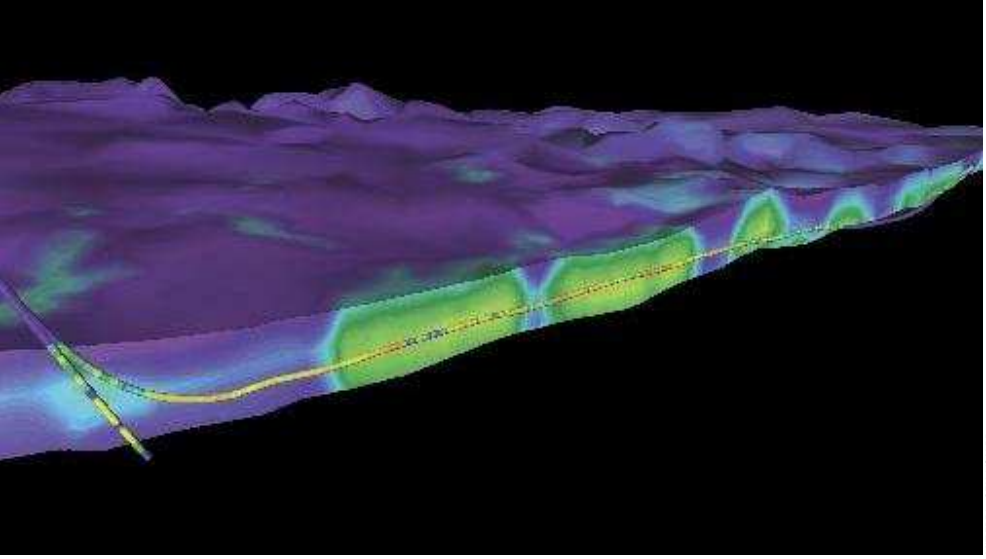
Abgetrenntes Kohlendioxid ließe sich nicht nur in erschöpften Erdöl- und Erdgaslagerstätten oder in tiefen Salzwasserleitern speichern, sondern auch in Mineralien, die mit dem Gas Karbonate bilden, sowie in Kohleflözen und in der Tiefsee.

Mineralien könnten an der Erdoberfläche sogar noch mehr CO_2 aufnehmen als saline Aquifere in der Tiefe. Das Magnesiumoxid in den beiden häufigen Mineralien Serpentin und Olivin verbindet sich mit Kohlendioxid zu einem stabilen Karbonat. Allerdings ist die Reaktionsgeschwindigkeit für praktische Zwecke viel zu gering. Vielleicht ließe sie sich genügend steigern, wenn man die Mineralien zu feinem Pulver zerreibt, um die Oberfläche zu vergrößern, an der die Umsetzung stattfindet.

Die Poren kohlehaltiger Gesteinsformationen haben oft Methan eingelagert. Dieses entweicht teils beim Abbau, was immer wieder unterirdische Explosionen verursacht, bei denen Bergleute umkommen. Man könnte komprimiertes Kohlendioxid in unerschlossene Kohlenflöze pumpen, wo es das angelagerte Methan ersetzen und austreiben würde. Dieses ließe sich dann gewinnen und als Kraftstoff verkaufen.

Das Einleiten von Kohlendioxid in die Tiefsee ist umstritten. Befürworter dieser Lösung machen geltend, dass CO_2 aus der Luft fortwährend in die Meeresoberfläche eindringt, weil ein chemisches Ungleichgewicht zwischen der Konzentration des Gases in der Atmosphäre und im Ozean herrscht. Da durch das Versenken von Kohlendioxid dessen Anteil in der Luft langsamer steigt, löst sich weniger davon im Oberflächenwasser. Deshalb würde bei einer Speicherung im Ozean das Kohlendioxid teilweise von den höheren Wasserschichten in die Tiefsee verlagert. Das käme den Meeresbewohnern zugute, weil sie größtenteils in Oberflächennähe leben.

Gegner einer Versenkung im Meer pochen dagegen auf internationales Recht, das es verbietet, Abfälle in den Ozeanen zu entsorgen. Außerdem weisen sie darauf hin, dass sich die Ausbreitung des Kohlendioxids nach seiner Einleitung nur schwer verfolgen ließe. Dabei können sie sich auf die öffentliche Meinung stützen, die in vielen Teilen der Welt dazu tendiert, die Ozeane in Ruhe zu lassen.



MIT FRDL. GEN. VON BP

dioxid anfallen – etwa 100 000 Barrel am Tag. Bei einer Betriebsdauer von 60 Jahren beliefe sich das auf insgesamt drei Milliarden Barrel, also einen halben Kubikkilometer. Die kleinsten der als gigantisch bezeichneten Ölfelder, von denen es etwa 500 gibt, enthalten ungefähr ein Sechstel dieses Volumens. Jedes große Kohlekraftwerk mit CO_2-Abscheidung bräuchte also mindestens ein »gigantisches« Speicherreservoir für das anfallende Kohlendioxid.

Etwa zwei Drittel der Billion Barrel Erdöl, die bisher gefördert wurden, stammten aus derart riesigen Ölfeldern. Die Erdölindustrie hat also schon einige Erfahrung mit der Größenordnung der für die CO_2-Speicherung erforderlichen Einrichtungen und Prozeduren.

Zunächst sollten vorwiegend diejenigen Gesteinsschichten als Speicherhorizonte dienen, die sogar noch Gewinn versprechen. Dazu gehören weit gehend erschöpfte Ölfelder, in die Kohlendioxid eingepresst werden kann, um die Fördermengen zu erhöhen. Dabei pumpen Kompressoren das Gas in die schon großenteils ausgebeutete Lagerstätte. Dort reagiert es mit dem verbliebenen, schlecht gewinnbaren Erdöl und erhöht dadurch dessen Fließfähigkeit, sodass es sich leichter durch das poröse Gestein zu den Bohrlöchern bewegen kann. Insbesondere verringert das CO_2 die Grenzflächenspannung des Erdöls, von der dessen Reibung mit dem Umgebungsgestein abhängt. So erweckt es alte Ölfelder zu neuem Leben.

Die britische Regierung unterstützt derzeit innovative Projekte zur CO_2-Abtrennung in Erdgaskraftwerken, die mit der verbesserten Ausbeutung erschöpfter Ölfelder in der Nordsee gekoppelt sein sollen. In den USA können Betreiber solcher Felder mit dem Einpressen von Kohlendioxid heute bereits Gewinne erzielen, obwohl sie 10 bis 20 Dollar für die Tonne Gas zahlen müssen. Wenn die Erdölpreise weiter steigen, dürfte der Preis für abgetrenntes CO_2 gleichfalls anziehen, weil es die Förderung eines wertvolleren Guts ermöglicht. Dies sollte die Abtrennung von Kohlendioxid lukrativer machen und entsprechenden Projekten Auftrieb geben.

Gewöhnliche Salzwasser führende Sedimentschichten sind allerdings sehr viel verbreiteter als erschöpfte Öl- und Gasfelder. Deshalb dürften sie sich als Kohlendioxidspeicher letztlich durchsetzen. Die Geologen sind zuversichtlich, genügend natürliche Speicherkapazität zu finden, um einen Großteil des CO_2 unterzubringen, das im 21. Jahrhundert bei der Verbrennung fossiler Energieträger abgetrennt werden könnte.

Die Frage der Sicherheit

Allerdings sollte man auch die Gefahren nicht außer Acht lassen. Für jede potenzielle Speicherstätte besteht das Risiko einer allmählichen oder plötzlichen Leckage. Wenn das Kohlendioxid langsam entweicht, gelangt es einfach in die Atmosphäre zurück. Das rasche Ausgasen großer Mengen könnte hingegen gefährlicher sein, als das CO_2 überhaupt nicht zu speichern. Bevor die Behörden das Einpressen in eine Sedimentschicht genehmigen können, muss also der Nachweis erbracht sein, dass das Gestein weit gehend dicht und ein plötzlicher Ausbruch extrem unwahrscheinlich ist.

Zwar geht von Kohlendioxid in verdünnter Form keine Gefahr aus. Hoch konzentriert wirkt es jedoch erstickend, sodass ein schnelles Entweichen größerer Mengen schlimme Folgen haben kann. Davon zeugt die Naturkatastrophe, die sich 1986 am Nyos-See in Kamerun ereignete: Kohlendioxid vulkanischen Ursprungs war über Jahrzehnte hinweg langsam in tiefere Schichten des Kra- ▷

Kohlendioxidspeicherung in Europa

Auch hier zu Lande steckt das Deponieren von CO_2 im Untergrund noch überwiegend in der Projektphase. Es gibt staatlich geförderte Forschungsprogramme, aber die rechtliche Situation ist ungeklärt.

Von Peer Hoth

Die von Robert H. Socolow beschriebenen Methoden, das in Kraftwerken anfallende Kohlendioxid abzuscheiden und im Untergrund zu deponieren, gelten auch bei vielen europäischen Experten als mögliche Schlüsseltechnologien. Sie hätten für Deutschland als größtem europäischen Emittenten von CO_2 besondere Bedeutung, da im hiesigen Energiemix Kohle weiterhin eine maßgebliche Rolle spielen muss. Insbesondere die heimische Braunkohle ermöglicht für die Bundesrepublik eine sichere, relativ unabhängige Stromerzeugung. Unter allen fossilen Energieträgern hat sie jedoch die höchsten spezifischen CO_2-Emissionen pro Energieeinheit.

Betreiber und Hersteller von Kraftwerken, Forschungseinrichtungen und Universitäten in Deutschland forcieren deshalb mit Unterstützung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie die Entwicklung CO_2-armer bis emissionsfreier Kraftwerke – unter anderem in dem Forschungsprogramm Cooretec (CO_2-Reduktions-Technologien in fossil befeuerten Kraftwerken). Seit Dezember 2005 unterstützt die EU-Kommission eine Technologieplattform zur Entwicklung und praktischen Umsetzung solcher Anlagen im Zeitraum der nächsten zwanzig Jahre (European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants – ZEFFPP). Verschiedene Stromerzeuger in Deutschland und in anderen europäischen Staaten arbeiten bereits an Pilotprojekten zur CO_2-Abscheidung in Kraftwerken.

Für die unterirdische Speicherung des abgetrennten Kohlendioxids sind tiefe Salzwasser führende Aquifere, ausgeförderte Öl- und Gaslagerstätten und tiefe, nicht wirtschaftlich abbaubare Kohleflöze in Europa die wichtigsten Optionen. Salzwasser führende Gesteinsschichten besitzen dabei wegen ihrer weiten Verbreitung das größte Potenzial. Die Nutzung des CO_2 für die sekundäre Gewinnung von Öl und Gas aus erschöpften Lagerstätten ist dagegen wirtschaftlich besonders interessant. Norwegen und Großbritannien haben deshalb vor Kurzem einen Vertrag zur gemeinsamen Förderung der Kohlendioxidspeicherung in der Nordsee geschlossen. Auch das Verpressen von CO_2 in gering durchlässigen Kohleflözen bei gleichzeitiger Gewinnung von Methan erscheint ökonomisch attraktiv. Zumindest für die in Mitteleuropa vorkommenden Kohlearten wirft es allerdings bisher nicht gelöste geotechnische Probleme auf.

Europäische Forschungsprojekte, die sich dem Problem der Deposition von Kohlendioxid im Untergrund widmen, sind Castor (»CO_2 from Capture to Storage«) mit dreißig Partnern von Industrie und Forschung aus elf europäischen Ländern, CO_2Store (mit dem Fokus der Aquiferspeicherung), CO_2GeoNet (ein Netzwerk europäischer Forschungszentren) und CO_2Sink (Pilotanlage zur CO_2-Injektion im brandenburgischen Ketzin unter Federführung des GFZ Potsdam). Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert seit Herbst 2005 ein integratives Forschungsprogramm, das sich auf die Entwicklung von Technologien für eine sichere, dauerhafte Speicherung von Kohlendioxid und auf die Entwicklung verlässlicher Methoden zur permanenten Überwachung geeigneter Standorte konzentriert. Dabei werden auch unkonventionelle Optionen wie die Fixierung in fester Form oder die mikrobiologische Umwandlung untersucht.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) befasst sich seit 2000 aktiv mit dem Thema. Sie ist in zahlreiche europäische Forschungsprojekte eingebunden und hat erste exemplarische Studien zur Deposition in Aquiferen und ausgeförderten Erdgaslagerstätten sowie grobe Abschätzungen des Speicherpotenzials für Deutschland durchgeführt. Dabei ging es auch um Aspekte der Langzeitsicherheit. Eine systematische, flächendeckende Erfassung und Charakterisierung aller Speicher- und Deckschichten existiert für den tieferen Untergrund Deutschlands allerdings nicht. In Zusammenarbeit mit der Industrie und den Geologischen Landesämtern hat die BGR kürzlich eine erste Initiative dazu ergriffen.

In Europa gibt es bisher nur ein großtechnisch realisiertes Projekt zur CO_2-Abscheidung und Speicherung. Seit 1996 hat Statoil jährlich ungefähr eine Million Tonnen Kohlendioxid bei der Aufbereitung von Erdgas im Sleipner-Feld in der norwegischen Nordsee abgetrennt und in eine Salzwasser führende Schicht oberhalb der Gaslagerstätte verpresst. Die großtechnische Speicherung von CO_2 im Untergrund wird außerdem in Kanada und Algerien betrieben. Die Technik dazu ist also grundsätzlich vorhanden und kontrollierbar.

Juristisch wirft das Deponieren in ehemaligen Erdgas- und Ölfeldern vermutlich die geringsten Probleme auf, da es als »Kohlenstoff-Rückführung« gelten kann. Was die Speicherung in tiefen Salzwasser-Aquiferen angeht, ist die rechtliche Situation in Europa unklar. Die Einleitung in die Tiefsee wird allgemein abgelehnt.

Wenn die von Socolow aufgeworfenen Fragen zur Langzeitsicherheit positiv beantwortet und die rechtlichen Aspekte geklärt sind, kann das Verpressen von CO_2 in tiefen Gesteinsschichten eine Brückenfunktion übernehmen, bis eine ausreichende Versorgung mit erneuerbaren Energien möglich sein wird. Allerdings bedarf es weiterer technologischer Fortschritte, um den Energiebedarf für die Abscheidung und die Verpressung des CO_2 zu verringern und somit den zusätzlichen Mehrverbrauch an fossilen Brennstoffen und den Anstieg der Stromgestehungskosten zu begrenzen. Gelingt dies, kann die Technologie ein zeitlich befristeter Baustein einer nachhaltigen Energieversorgung sein.

Peer Hoth ist Geologe und arbeitet derzeit bei der BGR in den Bereichen Energie und Geotechnische Sicherheit/Endlager. Er hat Erfahrungen aus Projekten bei verschiedenen Institutionen und Firmen, mit den Schwerpunkten: Exploration von Erdgas, Endlagerung radioaktiver Abfälle und Nutzung der Erdwärme.

MIT FRDL. GEN. VON BP

Das Erdgas, das BP, Statoil und Sonatrach Salah-Projekt in Südalgerien fördern, enthält für kommerzielle Zwecke zu viel Kohlendioxid. Der Überschuss wird durch chemische Absorber entfernt, komprimiert und in eine Gesteinsschicht in 2000 Meter Tiefe gepresst. Die Pumpleistung beträgt dabei ein Sechstel derjenigen, die bei einem Kohlevergasungs-Kombikraftwerk mit tausend Megawatt Leistung erforderlich wäre, welches das anfallende CO_2 abtrennt und deponiert.

▷ tersees eingesickert. Eines Nachts wurden bei einer plötzlichen Umschichtung des Wassers innerhalb weniger Stunden 100 000 bis 300 000 Tonnen CO_2 frei. Das Gas, das schwerer als Luft ist, floss durch zwei Täler abwärts und erstickte 1700 Menschen, die dort lebten, sowie einige tausend Stück Vieh. Eine solche Tragödie darf nicht durch die Kohlendioxidspeicherung ausgelöst werden. Deshalb gilt es sicherzustellen, dass kein CO_2 in bodennahe Hohlräume diffundieren kann, von denen ein plötzlicher Ausbruch möglich ist.

Auch wenn die allmähliche Leckage keine Lebensgefahr mit sich bringt, macht sie allerdings das klimapolitische Ziel der Speicherung zunichte. Deshalb ist es wichtig herauszufinden, unter welchen Bedingungen sie auftreten könnte. Komprimiertes Kohlendioxid hat in Salzwasser in großen Tiefen einen ähnlichen Auftrieb wie Erdöl und Erdgas. Es bewegt sich deshalb nach oben, bis es auf eine undurchlässige Gesteinsschicht – einen so genannten Deckkörper – trifft, die es am weiteren Aufdringen hindert.

In dieser Situation gleicht das Kohlendioxid vielen kleinen Gasballons unter einem Zirkuszelt. Nur wenn dieses einen Riss hat oder so geneigt ist, dass ein Ballon einen Weg zur Seite hin nach oben findet, ist ein Entweichen möglich. Um die Sicherheit der Speicherung zu prüfen, müssen Geologen also zum einen nach Verwerfungen im Deckkörper suchen, die als Auslass fungieren könnten, und zugleich den Druck ermitteln, bei dem die Sperrschicht aufzubrechen droht. Zum anderen gilt es, das langsame horizontale Fließen des Kohlendioxids von den Injektionsstellen weg abzuschätzen.

Oft ähneln die Sedimentschichten riesigen Pfannkuchen. Wenn sie nur wenig geneigt sind und das Kohlendioxid in ihrer Mitte eingepresst wird, sollte das Gas erst nach Zehntausenden von Jahren den Rand erreichen. Bis dahin, so glauben die Forscher, dürfte es sich großenteils im Salzwasser gelöst haben oder in den Poren eingeschlossen worden sein.

Selbst bei günstigen geologischen Bedingungen scheint die Nutzung von Speicherhorizonten allerdings problematisch, wenn alte Bohrlöcher vorhanden sind. In Texas zum Beispiel gibt es mehr als eine Million von ihnen. Viele sind inzwischen stillgelegt und mit Zement verplombt. Ingenieure befürchten, dass CO_2-gesättigtes, saures Salzwasser von der Einpressstelle zu einem alten Bohrloch fließen, den Betonpropfen anätzen und aussickern könnte. Um herauszufinden, wie realistisch diese Annahme ist, versetzen einige Forscher jetzt im Labor Zement mit Salzwasser und nehmen Proben von den Plomben. Kalksedimente sind in diesem Punkt weniger anfällig als Sandstein, weil sie dem sauren Salzwasser viel von seiner ätzenden Wirkung nehmen.

Die Regierungen sollten rasch entscheiden, wie lange eine Formation das Kohlendioxid zurückhalten muss, um als Speicher zulässig zu sein. Umweltschützer und traditionelle Wirtschaftswissenschaftler geben unterschiedliche Empfehlungen. Folgt man dem ethischen Prinzip, dass heutige Aktivitäten keine negativen Auswirkungen auf künftige Generationen haben dürfen, könnte die Speicherung in einer Gesteinsschicht, die das Kohlendioxid nur 200 Jahre lang festhält, wohl nicht genehmigt werden. Ein Ökonom dagegen würde dasselbe Projekt vermutlich gutheißen, weil er davon ausgeht, dass in zwei Jahrhunderten bessere Speichermethoden existieren.

Die kommenden Jahre werden für die Klimaentwicklung entscheidend sein. Die Politik muss Bedingungen schaffen, unter denen es sich für Unternehmen lohnt, die Kohlendioxidemissionen zu senken. Außerdem sollten erste Genehmigungen für unterirdische CO_2-Speicher erteilt werden. Zusammen mit hohen Investitionen in eine effizientere Energienutzung, in erneuerbare Energiequellen und – sofern in der Öffentlichkeit akzeptiert – in die Atomenergie kann die Abtrennung und Speicherung von Kohlendioxid erheblich dazu beitragen, der globalen Erwärmung entgegenzuwirken. ◁

Robert H. Socolow ist Professor für Maschinenbau sowie Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Princeton (New Jersey). Der studierte Physiker leitet gemeinsam mit dem Ökologen Stephen Pacala die Carbon Mitigation Initiative der Universität. 2003 erhielt er den Leo Szilard Lectureship Award der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Carbon dioxide capture for storage in deep geological formations – results from the CO_2 capture project. Von David C. Thomas (Hg., Bd. 1) und Sally M. Benson (Hg., Bd. 2). Elsevier, 2005

Prospects for CO_2 capture and storage. International Energy Agency. OECD/IEA, 2004

Möglichkeiten zur untertägigen Speicherung von CO_2 in Deutschland – eine Bestandsaufnahme. Von F. May et al. in: Geotechnik, Bd. 26, S. 162, 2003

Die Entsorgung von Treibhausgasen. Von Howard Herzog, Baldur Eliasson und Olav Kaarstad in: Spektrum der Wissenschaft, 5/2000, S. 48

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

wis
wissenschaft in die schulen!

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu intensiver Beschäftigung mit der Wissenschaft geben? »Wissenschaft in die Schulen!« bietet teilnehmenden Klassen einen Klassensatz **»Spektrum der Wissenschaft«** oder **»Sterne und Weltraum«** kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.
www.wissenschaft-schulen.de

Das Ufo von Wolfsburg

Experimente ohne Lehrer: Im Ausstellungszentrum »phæno« spielen die Besucher mit den Naturgesetzen.

Von Sven Titz

Nein, es ist weder ein Ufo noch ein gestrandetes Kreuzfahrtschiff. Das schroffe, kantige Betongebäude, das wie ein Kristall wirkt, ist das Werk der irakischen Architektin Zaha Hadid und beherbergt auf einer Fläche von 9000 Quadratmetern das Science Center »phæno«. Ende November 2005 ist das 80-Millionen-Euro-Projekt der Stadt Wolfsburg eröffnet worden.

Die Rolltreppe befördert den Besucher durch graue Kraterlandschaft mitten ins Geschehen: Auf zwei Stahlseile, die von der Decke senkrecht nach unten verlaufen, sind vier unterschiedlich große Gummibälle aufgefädelt, rechts wie die Kugeln eines Schneemanns mit dem kleinsten Ball zuoberst, links in umgekehrter Reihenfolge. Hebt man die Bälle zusammen an und lässt sie fallen, springt auf der rechten Seite nur ein Ball – der kleinste – bis zur Decke und läutet dort eine Glocke, von den linken dagegen will sich keiner so richtig aufraffen.

Ein paar Meter weiter finden weniger elastische Stöße statt: Unermüdlich werfen sich Schüler mit aller Kraft gegen eine blaue Turnmatte an einer Wand und lesen den übertragenen Impuls auf einer Anzeigetafel ab. Eine friedlichere Art, sich abzureagieren, ist noch nicht erfunden worden!

Nebenan schwebt ein Cartesischer Taucher im Wasser auf und ab, da drüben kann man sich anschauen, wie eine Violinsaite schwingt, und ein paar Meter weiter rollt ein eigenartiges Gefährt auf dreieckigen Rädern (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/1994, S. 10).

Zusammenhängende Themenfelder sind zunächst nicht zu erkennen. »Für manche Lehrer, die mit ihren Klassen kommen, ist phæno geradezu eine Provokation, denn Lehrer sollen ja immer Klarheit schaffen«, sagt verschmitzt Peter Rösner, der Leiter der Experimentierfelder.

Die Schrifttafeln zu den Exponaten enthalten kaum mehr als eine Bedienungsanleitung und eine knappe Erklärung. Wer sein Wissen vertiefen und seine Stirnfalten glätten möchte, kann die unaufdringlichen, rot gewandeten »phæno-men« oder »phæno-women« um Rat fragen. Das sind nicht nur die üblichen Studenten; die Mischung ist ähnlich bunt wie das Publikum – ein phæno-man ist sogar Bauunternehmer.

»Wir wollen den Besucher zum Entdecker machen, ihn anregen«, erklärt der Physiker Rösner. Einer der Ausstellungsmacher, der Science-Center-Veteran Joe Ansel, verfolge mit seinen Exponaten schon immer genau dieses Ziel: *informal learning*. Man lernt, ohne dass das Lernen geplant ist. Es gibt Antworten auf Fragen, die man sich nie zuvor gestellt hat – etwa die nach den hüpfenden Gummibällen (für die Antwort siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2004, S. 101). Wollte man den Erfolg durch einen Fragebogen mit gezielten Fragen zur Physik am Ausgang messen, wäre das Ergebnis wahrscheinlich kläglich. Aber das ist auch nicht das Konzept der Ausstellungsmacher. Wer phæno verlässt, soll mehr neue Fragen mitnehmen als Antworten. Die Denkbarrieren brechen beim Spielen, durch *learning by doing*. Eine Betonwand trägt das passende Kafka-Zitat: »Verbringe nicht die Zeit

phæno – das größte Science Center Deutschlands

SVEN TITZ

mit der Suche nach einem Hindernis, vielleicht ist keines da.«

In der Echoröhre ist ein Hindernis allerdings unentbehrlich. Quer durch die Halle, über den Köpfen der Besucher, zieht sich eine rote, viele Meter lange Röhre. In der Mitte und am Ende lassen sich per Seilzug Klappen schließen. Wenn man dann hineinruft, schallt ein Echo fast wie in den Alpen zurück.

Kunst oder Wissenschaft? Ja

Bei einem anderen Experiment ist der Schall nur ein Nebenprodukt: Was aussieht wie eine große Pauke, ist eine Luftkanone. Auf der Rückseite befindet sich ein kreisrundes Loch, und der Luftstoß, den ein Paukenschlag erzeugt, lässt in einigen Metern Entfernung die dort aufgehängten Glöckchen klingeln.

Die größte Attraktion ist ein Feuertornado, wie er in der Natur über Waldbränden vorkommt. Alle Viertelstunde riecht es etwas verbrannt; dann ringeln sich die von Kerosin gespeisten Flammen etwa fünf Meter hoch. Auch sonst wird in dem Haus viel Wirbel gemacht: Kunstvoll angeordnete Düsen blasen »Rauchringe« und (gewöhnliche) Tornados in die Luft; anstelle des Rauchs machen Nebeltröpfchen die Luftbewegung sichtbar. In einem riesigen Bottich rotiert ein Wasserstrudel vor sich hin.

Überhaupt fasziniert das Wasser in seinen Erscheinungen. Wer möchte, kann zwei künstlichen Geysiren stundenlang beim Spucken zugucken oder in einem durchsichtigen langen Kasten einen Tsunami erzeugen. Mit der Zeit verformt die Brandung sogar den Miniaturstrand. Nebenan beugt sich nachdenklich ein Mann über ein Becken und wühlt im Sand, schiebt Metallhindernisse hin und her: Wasser fließt die schiefe Ebene hinab und mäandriert um die Sandhaufen und die Metallbarrieren herum – Erosion life. Hier kann sich jeder einen eigenen Drei-Schluchten-Staudamm bauen.

Auch moderne Elektronik hat ihren Auftritt. Vor einer Leinwand machen zwei Mädchen kichernd seltsame Verrenkungen. Sie versuchen, Seifenblasen zu erwischen, die rings um ihre Schatten auf der Leinwand hinabschweben. Sobald die Arme der Silhouetten die Blasen »berühren«, erklingt ein Glockenton, und die Blasen weichen aus – wie die videogestützte Software für das Kunststück funktioniert, kann man nur erahnen.

Ähnlich künstlerisch wie das Experiment mit den virtuellen Seifenblasen muten viele Schaustücke an – bei ungefähr 40 Exponaten haben Künstler mitgewirkt. Diese Idee geht auf Wolfgang Guthardt zurück, den Initiator von phæno und ehemaligen Kulturdezernenten der Stadt. »Sogar Kunstkurse von Schulen und Universitäten kommen zu uns«, sagt Rösner. Da sind zum Beispiel die 24 ▷

PHAENO / KARSTEN KOCH

Quecksilber? Nein, Luft. Das Bild wird durch Spiegel auf den Kopf gestellt; was da wogt und glitzert, ist die Wasseroberfläche, von unten gesehen.

Weltweit gibt es bereits mehrere hundert dieser Spielplätze der populären Wissenschaft. Die Exploratorien in San Francisco und Toronto machten 1969 den Anfang. In Deutschland gibt es außer dem phæno eigenständige Science Centers in Bremen, Flensburg, Heidelberg, Suhl, Essen, Peenemünde, Lüdenscheid, Templin, Gießen und Fulda sowie entsprechende Abteilungen im Deutschen Museum in München, im Deutschen Technikmuseum Berlin und im Deutschen Hygiene-Museum Dresden.

Im Gegensatz zu anderen Science Centern, etwa dem »Universum« in Bremen, tritt in Wolfsburg die Pädagogik in den Hintergrund. Die Ausstellungsmacher haben sich von jeder Systematik oder Einordnung nach Themen befreit, wodurch ihr Werk ziemlich anarchisch wirkt. Viele Versuche hat der Kurator Joe Ansel entworfen, der lange bei dem Vorläufer in San Francisco mitwirkte. Außerdem kooperiert phæno mit dem Schweizer Science Center »Technorama« in Winterthur – viele Ideen stammen von dort.

Einer der Urheber der Science-Center-Bewegung war übrigens ein Deutscher: Hugo Kükelhaus stellte 1967 auf der Expo in Montreal erstmals sein »naturkundliches Spielwerk« vor, das er für Schulen in Dortmund entworfen hatte. Sein Werk richtete sich gegen die Entfremdung des modernen Menschen von der sinnlichen Erfahrungswelt. Kükelhaus' romantisches Konzept musste offenbar erst den Umweg über das pragmatische Amerika nehmen, um hier zu Lande Anklang zu finden.

phæno – Die Experimentierlandschaft
Willy-Brandt-Platz 1
(direkt am Hauptbahnhof)
38440 Wolfsburg
www.phaeno.de
Informations- und Buchungstelefon: 0189 1060600
geöffnet dienstags bis sonntags
sowie an Feiertagen 10–18 Uhr
Kinder bis 6 Jahre: frei
Jugendliche von 6 bis 18 Jahren: 7,– Euro
Erwachsene: 11,– Euro, ermäßigt 8,50 Euro
Kleinfamilienkarte (1 Erwachsener, 2 Kinder): 16,50 Euro

▷ ineinander greifenden Zahnräder in einer Vitrine. Das erste dreht sich, angetrieben von einem Elektromotor, noch recht flott, mit 11 Umdrehungen pro Minute. Doch die Untersetzung von einem Zahnrad zum nächsten beträgt 1:8,6 – jedes weitere Zahnrad rotiert also um dieses Verhältnis langsamer. Dann muss sich ja das 24. Zahnrad extrem langsam drehen. Oh, es ist einbetoniert! Aber das macht nichts; es würde für eine Umdrehung 489 Billionen Jahre brauchen. Bis dahin ist die Erde längst wieder verdampft (Spektrum der Wissenschaft 2/2004, S. 102).

Steuern mit Geisteskraft

Alle anderen der ungefähr 250 Experimente erfordern etwas weniger Geduld. Um eine Brücke in Parabelform zu bauen, die auch ohne Mörtel hält, benötigen die Besucher nur ein paar Minuten. Und auch das dreiarmige chaotische Pendel hampelt nicht bis in alle Ewigkeit (Spektrum der Wissenschaft 1/1994, S. 72). Noch schneller – binnen weniger Sekundenbruchteile – reagiert die magnetische Flüssigkeit auf eine Veränderung des Magnetfelds. In bizarren Formen wölbt sie sich zum anziehenden Pol hoch.

Oft ist der Besucher ein wesentlicher Teil des Experiments. So kann er mit Hilfe einer Videokamera, eines Bildschirms und eines Rechners verfolgen, wie der eigene Blick über ein unbekanntes Foto wandert. Oder er kann (»Land like a cat!«) sein Gehör, seine Reaktionsschnelligkeit oder seine Geschmeidigkeit bei der Landung nach einem Sprung überprüfen. Eine Art Mikroskop macht die Blutkörperchen im eigenen Auge sichtbar. Beim Spiel »Mindball« geht es darum, einen kleinen Ball allein per Gedankenkraft in ein Loch zu bugsieren. In diesem Zweikampf gewinnt derjenige, der sich am besten entspannen kann; dies wird mit Elektroden am Kopf gemessen. Magnete lenken den Ball in die entsprechende Richtung (Spektrum der Wissenschaft 9/2005, S. 70).

Das Themenspektrum, mit dem phæno wirbt, klingt sehr breit: »Wind und Wetter, Spiele, Mikro, Makro, Materie, Licht und Sehen, Leben, Information, Energie, Bewegung«. Doch die meisten Exponate stammen aus der Physik. Es gibt auch biologische, geografische oder chemische Experimentierstationen. Der Versuch mit Säuren und Laugen am Computer ist allerdings ein schlechter Witz: In seiner Virtualität widerspricht er dem Konzept des Hauses. Doch es gibt Labore für Biochemie, Physik und Technik, in denen Schüler ausführlich und »in echt« experimentieren können.

Im oberen Geschoss – eigentlich ist es eine Terrasse – warten optische Tricks. Hier können Schüler ausprobieren, wie Albert Abraham Michelson mit Hilfe seines Interferometers die Lichtäther-Theorie prüfte, inklusive Laser und Vakuumpumpe. Oder man kann betrachten, wie Quecksilberperlen über die eigene Handfläche kullern. Nein, kein echtes Quecksilber, es ist nur Luft. Der Clou besteht darin, dass man eine Hand in ein Wasserbecken taucht – die Reflexion an der Unterseite der Wasserfläche lässt sich über seitlich angebrachte Spiegel anschauen (Bild S. 81). Diesen Effekt muss ich beim Tauchen im Schwimmbad immer übersehen haben …

In der Optikabteilung findet sich auch das Lieblingsexperiment von Peter Rösner. »Greifen Sie zu«, fordert er den Besucher auf, als der sich einem schwarzen Kasten nähert. In einer viereckigen Öffnung ist eine Stahlspirale zu sehen. Doch der grabscht ins Leere. »Nehmen Sie mal die Taschenlampe«, empfiehlt der Ausstellungsleiter. Die Stahlspirale glänzt und wirft einen Schatten, wie es die optischen Gesetze befehlen. Was ist da bloß faul? Der Trick ist nicht neu, aber trotzdem sehr gut. Während ebene Spiegel ein Bild hinter ihrer Oberfläche erzeugen, ist das beim Hohlspiegel anders – das Bild wird vor dem Spiegel hervorgerufen. Manch einer steht eine ganze Weile mit leerem Gesicht vor dem leeren Kasten …

Vormittags sind es vor allem Schulklassen, die phæno besuchen. Auch nachmittags strömen noch viele Kinder und Jugendliche durch die Kraterlandschaft im Innern des Gebäudes. Gegen Abend schlendern dann überwiegend erwachsene Paare zwischen den Exponaten hindurch. Übers Wochenende gehört phæno eher den Familien. »Pro Jahr wünschen wir uns 180 000 Besucher, also pro Tag gut 500«, sagt Rösner. Bisher wird dieser Wunsch deutlich übertroffen. ◁

Sven Titz ist promovierter Meteorologe und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

AUTOR

Missverstandene Klostermedizin

In der Öffentlichkeit wird sie oft fälschlich als Therapierichtung gesehen, vor allem seit Ökowelle und Esoterik dem Begriff neue Aktualität verliehen haben. Aber worum ging es bei der Medizin im Kloster wirklich?

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Von Hermann Josef Roth

In der Not nach dem Kriegsende 1945 blieb für die Menschen zwischen Rhein und Lahn oft nur noch die medizinische Hilfe aus dem nahen Kloster beziehungsweise den angeschlossenen Ordenskrankenhäusern. Selbst Pyramidon, damals gebräuchliches Medikament bei fiebrigen Erkrankungen, war aber im Spital längst ausgegangen. Unauslöschlich ist etwa die Erinnerung an die Gestalt in schwarzer Kutte: Schwester Bonita, wie sie beziehungsreich hieß, flößte dem schreienden Kind stattdessen puren Schnaps ein. »Klostermedizin« blieb nicht nur deswegen im Gedächtnis von Generationen haften. Noch heute liegen vereinzelt Spitäler sowie Alten- und Krankenpflege in dieser Region in Händen der Barmherzigen Brüder und Armen Dienstmägde Jesu, auch wenn inzwischen die Orden mangels Nachwuchs überwiegend auswärtige Kräfte einsetzen müssen. In vielen anderen Gegenden verhielt es sich ähnlich.

Ökowelle und esoterische Neigungen haben dem Begriff Klostermedizin verbreitet neue Aktualität verliehen und gleichzeitig Erinnerungen verklärt. Wirkliche oder vermeintliche Schwächen der Schulmedizin wecken den Wunsch nach »alternativen Heilweisen im Einklang mit der Natur« und jenseits der Apparatemedizin, wie es abschätzig heißt. Die Stimmung begünstigt den Glauben an die Wirkung von Rezepturen, die werbeträchtig vor allem mit einem Namen in Verbindung gebracht werden: Hildegard von Bingen. Die Äbtissin, die im 12. Jahrhundert lebte, schien über heilsames Geheimwissen zu verfügen. Als Modetrend, vor allem in Deutschland und Österreich, geistert »die Klostermedizin« nun durch Medien und Gemüter. Doch was ist dran? Die Antwort verlangt die Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen und vor allem einen kritischen Blick in die historischen Quellen, um Missverständnisse zu vermeiden und Fehlurteile zu erkennen.

Schon das Basisdokument des westlichen Mönchtums, die Klosterregel des Benedikt von Nursia vom Anfang des 6. Jahrhunderts, gibt medizinische Anweisungen. Krankenfürsorge zählt zu den christlichen guten Werken und gilt dem Abt als Verpflichtung. Krankenhaus (für die Mönche) und Hospiz (zur Versorgung von Pilgern, Reisenden und Knechten) sind fester Bestandteil des Klosters und erhalten eine Grundordnung.

Kranksein gilt damals aber auch als Merkmal des sündigen Menschen. Der Abt »muss wissen, dass er die Sorge für kranke Seelen … übernommen hat«. Fasten und Abstinenz entfalten nach dieser Vorstellung doppelte Wirkung, indem sie einerseits Schwächen überwinden und körperliche Erkrankungen lindern oder heilen, andererseits aber die Makel von Schuld und Sünde tilgen. Das Kloster benediktinischer Prägung ist zuerst Heils-Stätte und dann erst Heil-Stätte.

Schon die Klosterregel des Benedikt von Nursia vom Anfang des 6. Jahrhunderts verpflichtet zur Krankenfürsorge, die immer eng mit Seelsorge verknüpft war. Dargestellt ist er hier auf einem Altar von 1453/55.

Die hingebungsvolle Pflege und die für uns noch heute vorbildliche Zuwendung zum Kranken entsprang christlicher Nächstenliebe, war wiederum verdienstvoll für die eigene Seligkeit und wurde als Seelsorge ausgeübt. Was auch immer die antike Medizin an Erklärungen liefern mochte und so sehr der Leidende um Linderung flehte – an erster Stelle und als Vorbedingung für körperliche Genesung standen Diätetik, Askese, Segnungen und Sakramente. Ohne Heil keine Heilung!

Das alles ist in alten Schriften nachzulesen. Dabei drängt sich unwillkürlich die Frage auf, ob es den Kranken damals um jeden Preis um Gesundung ging, war doch das Leiden von Gott geschickt und somit Strafe oder Prüfung. Wie auch immer: Die Menschen konnten zugleich auf professionelle medizinische Hilfe hoffen. Denn nach dem Zusammenbruch des Römischen Reichs, spätestens im 5. Jahrhundert, blieben die Klöster einziger Hort von Wissenschaft und Kultur, die Mönche Typ des Intellektuellen schlechthin. Die Monopolstellung galt auch für die Heilkunst, sodass vom 6. bis 12. Jahrhundert von einer authentischen Klostermedizin gesprochen werden kann.

Vornehmste Profanwissenschaft

Lektüre war Pflicht und zwang die Mönche, als Schreiber und Kopisten, Übersetzer und Autoren tätig zu werden. Vorlagen boten Werke und Überlieferungen griechischer und römischer Ärzte wie Hippokrates, der um 400 v. Chr. lebte, Dioskurides, Galen und Caelius Aurelianus im 1., 2. beziehungsweise 5. nachchristlichen Jahrhundert. Auch Schriften des Naturforschers Plinius des Älteren gehörten dazu, der beim Vesuvausbruch 79 n. Chr. umkam. Als Nachschlagewerk diente den Mönchen die Enzyklopädie »Etymologiae« des Isidor von Sevilla (570–636). Dieser Bischof war einer der bedeutendsten Gelehrten seiner Zeit. Ihm galt die Heilkunde als die vornehmste aller Profanwissenschaften.

Medizinische Theorie und Praxis hielten sich an das von der Antike tradierte Wissen, das später auch von den Arabern aufgegriffen und vermittelt wurde. Volkstümliche Heilverfahren spielten dabei eine eher untergeordnete Rolle; sie scheinen als rückständig empfunden worden zu sein.

Indikationen, Darreichungsformen und chirurgische Praxis bewegten sich somit im Rahmen des Althergebrachten. In der Tat hat die frühe Klosterheilkunde nur wenige eigene Werke hervorgebracht. Einige werden heute oft zitiert, wenn es um den Nimbus »Klostermedizin« geht. Als ältestes davon entstand um 788 das »Arzneibuch« der Reichsabtei Lorsch. Es bricht der Medizin eine Lanze, gab es doch Zeitgenossen, die da meinten, im Ernstfall genüge der religiöse Glauben.

Bekannter ist vielleicht der »Hortulus« des Walahfrid Strabo, von 838–849 Abt auf der Reichenau. In einer Art Gartengedicht besingt er zwei Dutzend Heil-, Genuss- und Zierpflanzen. Sie sind auch auf dem Originalplan des Klosters St. Gallen aus der Zeit um 830 eingetragen. Dieses Dokument zeigt nahe dem Kräutergarten auch Lage und Grundriss von Spital (Infirmarium), Drogenspeicher (Apotheke), Aderlassgebäude und Ärztehaus (siehe Plan S. 87). ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Hildegard von Bingen, unten links als Miniatur in einer Illustration ihrer Schriften, galt ihrer Zeit eher als große Mystikerin denn als Heilkundige. Kräuter waren in ihren Arzneien gegenüber anderem in der Minderheit.

▷ Formal zwar Dichtung, beschreibt dann Mitte des 11. Jahrhundert der so genannte »Macer floridus« – anders als noch der »Hortulus« – vorrangig die medizinischen Wirkungen der Pflanzen. Zur Deutung diente dem Verfasser Odo von Meung die antike Vier-Säfte-Lehre, die Humoralpathologie, mit der hier erstmals im monastischen Umfeld argumentiert wird. Ihr zufolge liegt die Ursache von Krankheiten in einer fehlerhaften Beschaffenheit der Körpersäfte. Entsprechend sehen die Therapieempfehlungen vor allem Mittel zum Ausscheiden verunreinigter Säfte sowie Schwitzbäder und Aderlass vor. Dieses Lehrsystem bildete dann ebenfalls die Basis für Autoren wie Constantinus Africanus, der in seinem Hauptwerk griechisch-arabisches Heilwissen vermittelte und 1087 im Benediktinerkloster Monte Cassino verstarb.

Auch die Äbtissin Hildegard von Bingen (1098–1179) stützte sich auf dieses System. In ihrer viel zitierten »Naturkunde« (Physica) sind allerdings fast die Hälfte der verzeichneten Heilmittel nicht pflanzlicher Herkunft. Dennoch wird in heutigen Medien hartnäckig Klosterheilkunde mit Phytotherapie gleichgesetzt. Dabei verwendete man damals ebenso oft und gerne Arzneien tierischer und mineralischer Herkunft. Daneben gab es eine erstaunlich gut entwickelte Chirurgie, ausgeübt freilich nicht von Akademikern, sondern von Praktikern wie Laienbrüdern oder »Weltleuten« im Dienst des Klosters. Dies erklärt, warum kaum irgendwelche Schriften davon zeugen. Archäologische Funde haben jedoch inzwischen Hinweise geliefert. Auf dem Gelände des ehemaligen Zisterzienserklosters Øm in Dänemark beispielsweise bargen Ausgräber chirurgische Instrumente aus Metall. Die Nadeln, Sonden und Wundschaber zeigen Gebrauchsspuren. Und nur nebenbei: Die ältesten bekannten funktionsfähigen Nietbrillen aus der Zeit um 1320 fanden sich unter dem Chorgestühl des Nonnenklosters Wienhausen bei Celle.

Vom 12. Jahrhundert an verloren die alten Abteien und Stifte allmählich ihre Monopolstellung, auch im medizinischen Bereich. Konkurrenz kam auf durch Reformbewegungen wie Zisterzienser und Kartäuser und durch neue so genannte Bettelorden wie Dominikaner, Franziskaner und Karmeliter. Vor allem aber entstanden in den aufstrebenden Städten mit den Universitäten unabhängige Bildungseinrichtungen, und dort durften Profanfächer wie Medizin endlich von weltlichen Personen gelehrt werden.

Herausragende Gelehrte wie der Dominikaner Albertus Magnus (um 1193–1280) orientierten sich an Aristoteles und entwickelten seine Naturlehre und Logik zur Scholastik weiter. Die traditionellen Klöster schlossen sich dem Trend in Lehre und Praxis an. Für Europa ging damit die Epoche der eigenständigen Klostermedizin zu Ende. Was blieb, war das soziale Aufgabenfeld des klösterlichen Medizinalwesens, der Dienst an den Armen, Kranken, Gebrechlichen und Sterbenden.

Anders in der Neuen Welt: Im Zuge der portugiesischen und spanischen Entdeckungsreisen des 16. und 17. Jahrhunderts entwickelte sich dort wieder eine Klostermedizin ganz eigener Prägung. Klöster und Orden gründeten weltweit Niederlassungen, deren Mission keineswegs nur aus Predigt und Kulthandlung bestand. Vielmehr waren Ordensleute anfangs wohl die Einzigen, die intensiv Sprache, Ernährungsgewohnheiten und Heilmittel der Eingeborenen studierten. Denen vermittelten sie umgekehrt Kenntnisse aus Europa.

Chinin geschmäht als Rinde der satanischen Papisten

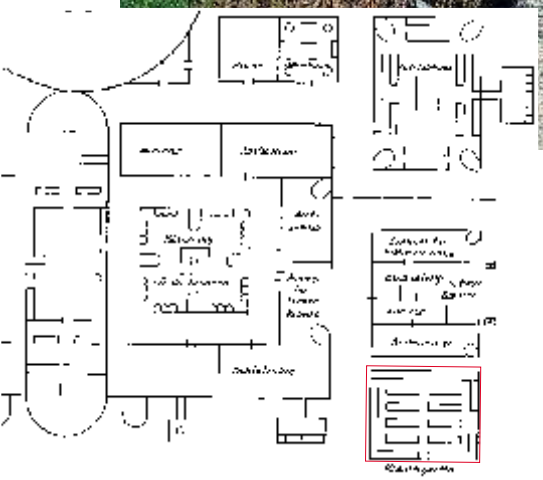
Der Austausch von Personen, Waren und Erkenntnissen setzte sich dann auf höherer Ebene zwischen den Kolonialklöstern und ihren europäischen Mutterhäusern fort. Lebende Pflanzen, Früchte und Sämereien, Gewürze, Duftstoffe, getrocknete Pflanzenteile, Essenzen und einfache Extrakte bereicherten nicht allein Küche und Salon, sondern vermehrten erheblich das Sortiment an Heilmitteln. Im spanischen Amerika waren Jesuiten und Dominikaner, im portugiesischen vor allem Franziskaner intellektuelle Vorreiter gerade auch auf medizinischem und naturwissenschaftlichem Gebiet.

Chinin, als Malariamittel und Bitterstoff bekannt, hat hier seinen entdeckungsgeschichtlichen Ursprung. Indios brauten seit jeher einen Heiltrank gegen Fieber aus der Rinde des Chinarindenbaums *(Cinchona pubescens)*. Angeblich soll erstmals in Brasilien ein Missionar – den Indios war Malaria unbekannt – am eigenen Leib die Heilkraft getestet haben. Sicher ist, dass Jesuiten die Chinarinde 1642 nach Europa brachten und in ihren Schriften die Anwendungen be-

IN KÜRZE

▶ Über die historische Klostermedizin existieren einige Missverständnisse in der Öffentlichkeit. Oft wird **Hildegard von Bingen** als die kenntnisreichste medizinische Quelle des Mittelalters angesehen und **Klosterheilkunde** mit Phytotherapie gleichgesetzt.

▶ Welche Rolle die Medizin in und aus dem Kloster über die Jahrhunderte spielte, verrät sich schon in **Bau und Ausstattung der Anlagen**. Das tatsächliche historische Wissen über **Heilmittel** und ihre Anwendung ist aber für Forscher schwieriger zu ermitteln als gedacht.



MITTELZELL VON NORDOSTEN: LANDESMEDIENZENTRUM BADEN-WÜRTTEMBERG; KLOSTERPLAN: MIT FRDL. GEN. VON HERMANN ROTH

Im 9. Jahrhundert besang Walahfrid Strabo, Abt auf der Reichenau, in seinem »Gartengedicht« die Pflanzen eines Klostergartens, oben rekonstruiert vor der Klosterkirche Mittelzell. Nach dem Klosterplan (links) von St. Gallen aus dieser Zeit lag der Kräutergarten (rot) beim Ärztehaus und Mönchsspital.

schrieben. Die Neuheit wurde lange argwöhnisch betrachtet. Die nichtkatholischen Engländer schmähten das Heilmittel als »Jesuitenrinde« und »Rinde der satanischen Papisten«.

Die Nutzung von Arzneien aus aller Herren Länder ist seitdem so selbstverständlich geworden, dass man ihre Herkunft fast vergessen hat. Wer denkt schon bei der Munddesinfektion daran, dass dabei vielleicht Extrakte aus dem chinesischen Storaxbaum *(Styrax benzoin)* – sie enthalten unter anderem Benzoate – verwendet werden.

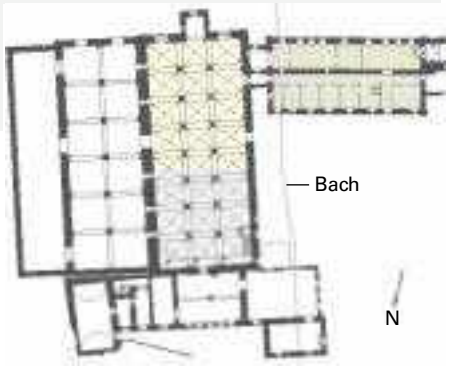
Noch sind die damaligen Transferwege von Ideen und Gütern über die internationalen Ordensverbände wenig erforscht. Die Denkmäler dieser Klosterkultur mit ihren Bibliotheken und Gärten ziehen eher Kunsthistoriker und Touristen an, weniger wohl Medizin- oder Pharmaziehistoriker. Dabei drängen die gewaltigen Baukomplexe die Erinnerung an die fruchtbare Wechselwirkung zwischen geistlicher und naturwissenschaftlicher Bildung im 17. und 18. Jahrhundert geradezu auf.

Beispielhaft dafür steht das Hieronomiten-Kloster von Belém bei Lissabon. Wie kaum ein anderes Bauwerk ist es aufs Engste mit der Seefahrt der Portugiesen verknüpft, denn alle großen Entdecker holten sich an den Gräbern von Heinrich dem Seefahrer (1394–1460) und Vasco da Gama (1468–1524) den Reisesegen. Hier und in anderen Abteien Portugals ließen sich Benediktiner und Franziskaner dann in Brasilien zum Bau der monumentalen Abteien und Konvente inspirieren, die bis heute von diesen frühen globalen Verflechtungen künden. Man denke etwa an die Komplexe in Igarassu, Salvador oder Rio de Janeiro, deren Anfänge auf diese Zeit zurückgehen (Foto S. 89).

Selten nur haben Ordensleute in den Kolonien als Mediziner oder Naturforscher Karriere gemacht. Eher eine Ausnahme bildet der spanische Augustinereremit Farfán (1532–1604) aus Sevilla, der es zum Leibarzt von König Philipp II. und zum Dekan der medizinischen Fakultät von Ciudad de México brachte. Von ihm stammt der damals viel beachtete Traktat »medicina domestica« (frei: Hausapotheke), in den er Erkenntnisse aus der Neuen Welt einfließen ließ.

Im 17. und 18. Jahrhundert, auf der Iberischen Halbinsel schon früher, erlangten die geistlichen Stifte und Klöster wieder eine Bedeutung, die der im Mittelalter kaum nachstand. Das Ende des Dreißigjährigen Kriegs 1648 schuf endlich auch in Deutschland Voraussetzungen für das Aufblühen der Barockkultur, die wesentlich zugleich eine klösterliche war. Allerdings unterschied sich die Mentalität im Barockstift grundlegend ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



Der frühgotische Krankensaal von Kloster Eberbach im Rheingau, heute Weinkeller, erinnert eher an ein Kirchenschiff (auf dem Grundriss gelb). Das barocke Spital (grün) verfügte dagegen über unterschiedliche Räume.

▷ von der in der mittelalterlichen Abtei. Die Entdeckungsfahrten hatten den geistigen Horizont erweitert und lebhaftes Interesse an Realien geweckt. Großzügige Neubauten und Freiräume in Gärten schufen in Klöstern Platz auch für Beobachtung und Experiment. Naturwissenschaftliche Studien wurden nunmehr um ihrer selbst willen betrieben. Zur Akklimatisation von Pflanzen aus den Kolonien errichtete man eigene Gebäude. Eine Vorstellung, wie das ähnlich auch anderswo ausgesehen hat, vermittelt Kloster Eberbach im Rheingau mit der Orangerie von 1755/56 und dem Gartenhäuschen von 1722. Die im Kern noch mittelalterliche Anlage war 1986 Drehort des Films »Der Name der Rose«.

Die Bedeutung von Medizin, Pharmazie und benachbarten Profanfächern bekam in der üppigen Ausstattung der Bibliothekssäle sichtbaren Ausdruck. Figurale Schnitzereien wie in den Klosterbibliotheken Sankt Gallen (Fotos S. 91) oder Waldsassen stellten Medizin und Naturwissenschaften allegorisch dar. Medizinische Werke waren in allen nennenswerten Klosterbibliotheken vorhanden. Aber nur selten traten Mönche oder Stiftsherren als Autoren auf. Man rezipierte fast alles, produzierte selbst wenig.

Wie der Mentalitätswechsel seit dem Mittelalter das Medizinalwesen verbessert hatte, spiegelt die Architektur von Eberbach ebenfalls beispielhaft wider. Dort stehen das alte Krankenhaus aus der Zeit um 1215/20 und das barocke »neue« von 1752/53 direkt nebeneinander: hier der frühgotische Krankensaal mit Altar an der Stirnwand, dort unterschiedlich bemessene Innenräume, die individuellen Bedürfnissen gerecht werden (Abbildungen links).

Anrufung bei Zahnleiden

Der konkrete Umgang mit Heilpflanzen und Arzneien lag nun überwiegend in den Händen von angestellten Ärzten, Apothekern, Badern, Pflegern und Gärtnern. Freilich praktizierten mitunter auch Priester, Mönche und Nonnen als Ärzte und Apotheker. Dafür entstanden eigens zum Zweck der Krankenpflege Hospitalorden.

Namen einzelner Klosterapotheker sind wenige überliefert, Bildnisse nur ausnahmsweise. Eines der ältesten Porträts zeigt den Benediktiner Florian Treffler (1483–1565) in Benediktbeuern. Georg Asam schuf das Ölgemälde 1682 nach einer älteren Vorlage von 1565. Aus dem bayerischen Polling ist ein Werk des Malers Johann Baptist Baader erhalten, das Frater Damian Honnakam (1726–1784) als Apotheker zeigt. Den Karmelitergeist *(Eau des Carmes)* entwickelte 1611 in Paris Pater Ulrich Eberskirch, ein gelernter Apotheker, auf der Grundlage des seit jeher geschätzten Melissengeists. Empfohlen wurde die alkoholische Mischung verschiedener ätherischer Öle innerlich bei leichten Magen-, Darm- und Einschlafstörungen sowie äußerlich gegen Muskelkater und Nervenschmerzen.

In merkwürdigem Gegensatz zum Aufstieg der Naturwissenschaften behielten Heiligenverehrung und Reliquienkult im barocken Lebensgefühl ihren angestammten Platz. Die Anrufung von Heiligen wie Odilia bei Augenleiden oder Apollonia bei Zahnleiden war nicht bloß verzweifelte Zuflucht, wenn gar nichts mehr half, sondern gehörte zum festen Bestandteil von Heilverfahren. Die Anwendung von Reliquien und Andachtsgegenständen war selbst in höchsten Kreisen üblich. Prominentes Beispiel

MIT FRDL. GEN. VON HERMANN ROTH

Dieses botanische Werk aus der Bibliothek des Zisterzienserinnenklosters Marienthal an der Neiße stammt aus dem 16./17. Jahrhundert und erläutert unter anderem die Verwendung von »Harnkraut« (vierte Pflanze). Empfohlen wurde es, wie der Name schon andeutet, beispielsweise bei Blasenentzündungen.

ist der spätere Kaiser Leopold I., dem bei schwerer Erkrankung durch einen Kapuziner ein geweihtes Stück Wolle aus einem Ordenskleid (Skapulier) in feierlicher Zeremonie aufgelegt wurde.

Unbekümmert vermengte man kausal begründbare Heilerfolge mit religiöser Sinngebung. Die Heilkraft des Wassers ist wohl immer in diesem Doppelsinn erfahren worden. In Bonn sprudelt noch heute eine Quelle, die Leib und Seele zu trösten verspricht. Das »Pützchen« lieh einem Stadtteil seinen Namen. Mit der Wallfahrt entwickelte sich bei dem 1696 gegründeten Kloster der Karmelitinnen der bis heute wohl bekannteste Jahrmarkt am Rhein.

Trotz des Fortschritts von Wissenschaft und Technik blieb man sich der Grenzen bewusst, die menschliche Erkenntnis nun einmal hat. Jenseits der Physik galt Metaphysik. Das Motiv »Christus der Apotheker« gelangte folgerichtig aus der Miniaturmalerei des 16. und 17. Jahrhunderts in die Volkskunst und mitunter sogar in die Tafelmalerei (Abbildung S. 91 links oben).

In den Barockstiften bildeten Apotheken analog den Bibliotheken, physikalischen Kabinetten und Naturaliensammlungen sowohl Repräsentationsräume im Stil der Epoche als auch wissenschaftlich konzipierte Einrichtungen. Sie ermöglichten eine sachgemäße Lagerung von Arzneidrogen ebenso wie die Präparation von Medikamenten aller Art im Labor. Einige der alten Apotheken sind mitsamt ihrer Einrichtung erhalten geblieben, manche können besichtigt werden, etwa die beim Kloster Andechs, die im 18. Jahrhundert noch von einem Benediktiner geleitet wurde.

Indem klösterliche Institute auch die Bevölkerung bedienten, mochten sie vor allem in Städten in Konkurrenz zu öffentlichen Apotheken treten, die hier bereits gegen Ende des Mittelalters verbreitet waren. In ländlichen Gegenden dagegen versorgten Stiftsapotheken oft als Einzige die Umgebung mit Medikamenten. Selbst Apotheken streng kontemplativer Klöster, wie die der französischen Kartause Grande Chartreuse, hatten für Außenstehende geöffnet.

Zwei einschneidende Ereignisse machten dem radikal ein Ende: in Frankreich die Revolution 1789 und in Deutschland die Säkularisation 1803. Gelegentlich konnten einzelne Ordensmitglieder Reste der Tradition über die Aufhebung hinwegretten. Bekannt ist die Karmelitin Maria Clementine Martin. Sie lebte ab 1826 in Köln, wo sie die von ihr entwickelten Produkte – Klosterfrau Melissengeist, ihr Kölnisch Wasser Doppelt und ihr Schnupfpulver – herstellte und vertrieb. In München verwaltete nach Auflösung seines Konvents Zacharias Pacht die Karmeliterapotheke und pachtete sie dann 1805. Sein Or- ▷

Im Zuge der spanischen und portugiesischen Entdeckungsreisen entstanden in der Neuen Welt Kolonialklöster – und eine Klostermedizin, deren Erkenntnisse in die Mutterhäuser zurückflossen. Hier der Kreuzgang des ehemaligen Franziskanerklosters in Igarassu (Brasilien)

MIT FRDL. GEN. VON HERMANN ROTH

▷ densbruder Joseph Leopold Wacker, ein gelernter Apotheker, übernahm bereits 1802 die Apotheke seines bisherigen Klosters in Schongau am Lech.

Neue Kongregationen füllten schon wenige Jahrzehnte später das spirituelle Vakuum und wählten Krankenpflege und Heilkunde zum Lebensinhalt. Freilich: Ihre medizinischen und pharmazeutischen Methoden waren und sind genau dieselben wie bei Kollegen draußen »in der Welt«. Was in heutigen Klöstern stattfindet, sollte man daher nicht Klostermedizin nennen, sondern Medizin im Kloster.

Medizinhistoriker beurteilen den Wert der Klostermedizin widersprüchlich. Kurt Sprengel hielt 1800 die Mönche für »des Namens der Aerzte unwürdig« und ließ sie bestenfalls als »fromme, fanatische Krankenwärter« gelten. Im Gegensatz dazu sprach Karl Sudhoff 1920 von der »Aneignung der Antike im Abendland« und stellte fest, dass konsequentes Christentum, wie von Mönchen und Nonnen praktiziert, in gewisser Hinsicht antike Standards in der Medizin sogar übertroffen habe.

Statt voreilig zu urteilen, muss es zunächst darum gehen, die schriftlichen Quellen kritisch zu sichten. Dazu hat sich 1999 an der Universität Würzburg eine freie Arbeitsgruppe von Medizinhistorikern, Naturwissenschaftlern, Philologen und Historikern gebildet, der auch ich angehöre. Ihr Ziel unter anderem: das historische Wissen über Heilmittel zu erforschen. Sie konnte bis jetzt über 500 Heilpflanzen aus etwa 600 Handschriften registrieren. Allerdings ist nach Jahrhunderten nicht immer eindeutig erkennbar, was die alten Bezeichnungen tatsächlich meinen. Das erinnert an die Schwierigkeiten im Umgang mit volkstümlichen Pflanzennamen im heutigen Deutsch. So kann die Bezeichnung Ringelblume einmal der Garten-Ringelblume *(Calendula officinalis)* gelten. Was aber auf der Schwäbischen Alb Ingele und im Aargau Ringelbluem heißt, ist das Weidenblättrige Ochsenauge *(Buphthalmum salicifolium)*. In den Folianten der Klöster trägt unsere Ringelblume den Namen »caput monachi « (Mönchshaupt), genauso wie der völlig anders geartete Kapernstrauch *(Capparis spinosa)*.

Schlamperei beim Abschreiben

Erschwerend kommt hinzu, dass man manche Pflanzennamen bereits unrichtig aus dem Arabischen in das lateinische Rezept aufgenommen hat, das damit von vornherein falsch ist. Nicht einmal eine beigefügte Abbildung der Pflanze in mittelalterlichen oder späteren Werken garantiert, dass der Text sich immer darauf bezieht. Wo wurde abgeschrieben, erweitert, fehlgedeutet oder sogar geschlampt? Solche Fragen versucht die Würzburger Arbeitsgruppe unter anderem zu klären, um eine einigermaßen sichere Identifizierung der wirklich gemeinten Pflanze zu erreichen.

Nicht erst wenn die Kunst von Arzt und Apotheker versagte, beide dargestellt als Putten im Barocksaal der Stiftsbibliothek St. Gallen, wurden Heilige angerufen. Welche Bedeutung dem Glauben zukam, zeigt auch das gängige Motiv »Christus der Apotheker«.

Als lebende Sprache war das mittelalterliche Latein zudem wandelbar. Die Bezeichnungen für Pflanzen, Tiere und Mineralien sind dementsprechend oft vieldeutig. Fehlurteile über den therapeutischen Wert der alten Verordnungen haben nicht selten ihren Grund darin, dass genau dieser Umstand außer Acht blieb. Ja, selbst die Beschreibung der Symptome kann vieldeutig sein (siehe Kasten unten).

Zu Fehlurteilen wie »Drecksapotheke« im übertragenen Sinn kann auch führen, dass die Wirkmechanismen und damit der Sinn der empfohlenen Behandlung nicht auf den ersten Blick zu erkennen sind. So soll man nach dem Lorscher Arzneibuch auf Wunden eine Paste aus Schafdung, Käseschimmel und Honig auftragen und zwanzig Tage belassen. Möglicherweise hat der Schimmelpilz antibiotische Wirkungen entfaltet, nachdem Bakterien aus dem Mist ihn dazu angeregt hatten. Antibiotika, so wissen wir heute, brauchen eine gewisse Einwirkungszeit. Das würde die verschriebene Verweildauer erklären. Honig wiederum wird wegen keimtötender Wirkung noch heute in Erfahrungsmedizin und Naturheilkunde angewendet.

Manche klösterlichen Arzneien und Therapien sind bis heute in der Volksheilkunde gebräuchlich. Fenchel, Thymian und Melisse wurden schon in mittelalterlichen Abteien gegen Beschwerden in den Atemwegen oder bei Verdauungsproblemen eingesetzt. Das Johanniskraut, bereits im Lorscher Arzneibuch gegen Melancholie und später zur Wundbehandlung empfohlen, gilt heutzutage gar als Modedroge bei nervösen Störungen und als Antidepressivum. Sein so genanntes Rotöl enthält unter anderem Hyperforin, das für die entzündungshemmende antimikrobielle Wirkung des Öls auf der Haut mitverantwortlich gemacht wird. Wirkstoffe anderer traditioneller Pflanzen

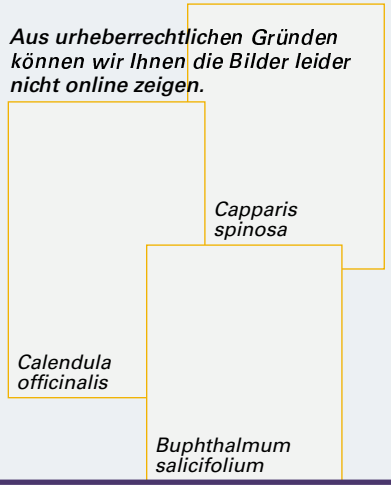
Welche Krankheit, welche Pflanze?

Mittelalterliche Texte sind oft vieldeutig. Hildegard von Bingen beispielsweise beschreibt als Krankheitsbild:

... qui ardentes febres in stomacho habet ...
(der brennende Fieber im Bauchbereich hat)
und
... stomachus eius veneno, id est eyter, plenus est ...
(sein Bauch ist voll von Gift, das heißt Eiter).

Nur aus dem literarischen Zusammenhang ergibt sich, dass gichtige Erkrankungen gemeint sind. Unter Gicht aber versteht sie alle Erkrankungen von Knochen und Gelenken.

Ebenso problematisch sind in mittelalterlichen und späteren Werken die Bezeichnungen der Pflanzen. Ringele zum Beispiel steht für die Garten-Ringelblume (linkes Foto), mit Ingele und Ringelbluem kann in manchen Regionen das Weidenblättrige Ochsenauge (unten) gemeint sein. Das lateinische *caput monachi* klösterlicher Schriften bezeichnet den Kapernstrauch (rechts oben), ebenso aber die Ringelblume.



Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

PUTTEN IM BAROCKSAAL DER STIFTSBIBLIOTHEK ST. GALLEN, MIT FRDL. GEN. DER STIFTSBIBLIOTHEK ST GALLEN

sind direkt oder indirekt in gängigen Medikamenten enthalten: Bekanntestes Beispiel dürften die herzwirksamen Glykoside des Roten Fingerhuts sein.

Hinter Klostermedizin verbirgt sich zwar viel Sinnvolles; der unbedachte Rückgriff heutiger Modeströmungen auf das Mittelalter aber führt zu Missverständnissen und kann sogar gefährlich sein, wenn Quellen falsch interpretiert und die Ergebnisse als Rezept empfohlen werden. Dies gilt auch für die derzeit heftig beschworene Hildegard von Bingen. Fehlende Kenntnisse ersetzte sie allzu oft durch visionäre Spekulationen, wie manche ihrer heutigen Jünger auch. Ihre Zeitgenossen scheinen wohl ihre mystische Kraft und ihre kirchenpolitische Rolle, kaum aber ihre Bedeutung als »Ärztin« erkannt und gewürdigt zu haben.

Gegen unreflektierte Übernahme

Hildegards große Zeit in dieser zweiten Rolle ist erst das 20. Jahrhundert, nicht das Mittelalter. Unmissverständlich erklärt deshalb die Würzburger Arbeitsgruppe: »Als Vermittler zwischen Erfahrungsmedizin und heutigen Therapieanforderungen möchte man … entschieden der unreflektierten Übernahme des alten Wissens in vermeintlich alternative Heilverfahren entgegenwirken.« Andererseits wird die übliche Unterbewertung des mittelalterlichen Wissensstands den geschichtlichen Tatsachen gleichfalls nicht gerecht, was sich durch jüngste Forschungen, auch der Würzburger Gruppe, immer deutlicher zeigt.

Ein Grund für die Unterbewertung mag dabei sein, dass die Titel medizinischen und naturwissenschaftlichen Inhalts dieser Zeit zahlenmäßig hoffnungslos hinter dem theologischen Schrifttum zurückstehen. So besaß die bedeutende Bibliothek der Zisterzienserabtei Himmerod in der Eifel im Jahr 1453 annähernd 2000 Bände, darunter gerade mal ein halbes Dutzend Sachbücher.

Für die ernsthafte Beschäftigung mit dem Thema gibt es gute Gründe: Alte Klosterstätten spiegeln durch ihren Lebensstandard recht getreu das wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Niveau ihrer Epoche. Disziplin der Kommunität und Ehelosigkeit sichern und überliefern prinzipiell authentischer, als das ein Adelssitz könnte, den vielleicht Fehden und Erbstreit schwächen. Das schafft geradezu ideale Voraussetzungen für die medizin-, pharmazie- und biologiehistorische Forschung.

Die Beschäftigung verspricht aber auch Gewinn für die eigene Lebensführung. Zeitlos gültig und von eigenständigem Wert bleibt nämlich der monastische Lebensrhythmus. Wo er in einer Atmosphäre von Stille und Beschaulichkeit noch konsequent gelebt wird, könnte er im Sinn einer ganzheitlichen Therapie wohltuende oder gar heilende Wirkung entfalten. Indem er aber mit dogmatischen Vorgaben und kirchlich-liturgischen Anforderungen verknüpft ist, bleibt dem Nichtgläubigen der Zugang erschwert. Ist das der Grund, warum viele Menschen nach Klöstern fernöstlicher Religionen Ausschau halten? ◁

Hermann J. Roth, Theologe und promovierter Botaniker, hat unter anderem grundlegende Studien zur mittelalterlichen Botanik publiziert. Derzeit beschäftigt er sich mit dem Transfer von Pflanzen und Drogen zwischen Portugal und seinen Handelsposten im 16. bis 19. Jahrhundert.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Klostermedizin. Sonderheft der Cistercienser-Chronik, Bd. 109, Heft 2, Bregenz 2002

Der Hortulus des Walahfrid Strabo. Aus dem Kräutergarten des Klosters Reichenau. Von Hans-Dieter Stöffler. 2. Aufl., Sigmaringen 2000

Das europäische Hospital. Von der Spätantike bis 1800. Von Dieter Jetter. Köln 1986

Die pflanzlichen Heilmittel bei Hildegard von Bingen. Von Irmgard Müller. Salzburg 1982 (als Taschenbuch, Herder Verlag, Freiburg 1993)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

MATHEMATIK

Georg Glaeser

Geometrie und ihre Anwendungen

in Kunst, Natur und Technik

Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, München 2005. 420 Seiten, € 35,–

Vergessen Sie das öde Schema Definition – Satz – Beweis, die unerbittliche Strenge und Kleinlichkeit, die gnadenlose Abstraktion, die seit den Tagen Euklids die Geometrie bis in den Schulunterricht hinein geprägt hat. Georg Glaeser, Professor für Geometrie und Mathematik an der Hochschule für angewandte Kunst in Wien, lädt uns mit einer Fülle von Bildern – hauptsächlich Fotos – zu einer Entdeckungsreise ins Reich der Formen ein. Damit stellt er seinem »Mathematischen Werkzeugkasten« (Elsevier, 2004), der sich mit angewandter Mathematik im Allgemeinen befasste, ein geometrisches Pendant zur Seite.

»Formen« meint hier vor allem »frei von Zahlen«. Das ist der »synthetische« Stil der Geometrie, mit Axiomen und Definitionen, aber ohne Koordinaten und Gleichungen, den Euklid (um 300 v. Chr.) in seinen »Elementen« geprägt hat. Manchmal geht es analytisch im Stile von Descartes (1596–1650) und Fermat (1601–1665) viel einfacher, was der Autor auch keineswegs verschweigt.

»Formen« meint Anschauungsvermögen, Entwicklung eines sechsten Sinns. Dessen Förderung ist eine alte, aber weit gehend ungehört verhallte Forderung, zum Beispiel der Meraner Reformbewegung von 1905. Heute ist sie von großer Brisanz, verlangen doch viele Computeranwendungen gutes räumliches Anschauungsvermögen. Insofern Glaesers Buch zeigt, wie dies kultiviert werden kann, ist es auch eine Bereicherung der didaktischen Diskussion.

Einen breiten Raum nehmen im Buch Projektionen ein, insbesondere für die darstellende Geometrie (»Wie kann ich einen Körper zweidimensional wiedergeben?«) und die Computergrafik. Viele Feinheiten wie Schattenwurf und Oberflächengestaltung kommen zur Sprache und ins Bild. Klar, dass Glaeser hier auch auf die Perspektive und die Fotografie, auf Ray-tracing und Militärriss (eine spezielle Art der Parallelprojektion) eingeht. Andere Themen sind Polyeder, Kurven und Flächen, Kegelschnitte, Kinematik und Bewegungen im Raum. Überzeugend wird gezeigt, dass die Geometrie im modernen Leben eine wichtige Rolle spielt: Maschinenbau, Architektur, Bauingenieurwesen, Design, bildende Kunst und Musik sind nur einige Bereiche, die Glaeser anspricht.

Die Darstellung ist informativ und spannend, voller Ideen; sie orientiert sich stets an Abbildungen, Modellen und anderem Bildmaterial. Der Sehsinn kommt voll auf seine Kosten, wie schon ein Durchblättern des Buchs deutlich macht.

Links Rotationsflächen in Technik und Natur. Unten Torsion einer Raumkurve: Nicht nur die Richtung der Tangente ändert sich von Punkt zu Punkt. Das merkwürdige Gefühl im Bauch rührt auch daher, dass die Ebene des Krümmungskreises um die Tangente rotiert.

Das alles ist sehr anregend, aber auch sehr anspruchsvoll. Will man dem Tempo wirklich folgen, bedarf es einiger Anstrengung. Es ist so ähnlich wie bei Lance Armstrong: Schaut man ihm zu, sieht Radfahren ganz einfach aus. Die Qual beginnt erst, wenn man selbst im Sattel sitzt.

Im Hauptteil kommt der Autor bewusst ohne mathematische Vorkenntnisse und ohne Spitzfindigkeiten aus; in den kleingedruckten Ergänzungen – meist kurze Beweise – ist das anders. Selbst dort vermeidet Glaeser die systematische und kleinschrittige Vorgehensweise eines klassischen Lehrbuchs; aber eine gewisse gedankliche Arbeit ist bereits erforderlich. »Der Geradenraum« – das heißt die Menge der Geraden im dreidimensionalen Raum – »ist vierdimensional. Das sagt sich leicht, aber man muss es erst einmal verkraften«, warnt der Autor selbst seine Leser.

Das Buch ist voll von überraschenden Anwendungen der Geometrie; zwei Beispiele, die mir gut gefallen haben, sind der Schattenwurf von Hochhäusern (S. 71) und die Fabrikation der zweifach gekrümmten Kartoffelchips (S. 118). Kaum Beachtung findet die Geschichte der Geometrie, und wenn, dann eher unzuverlässig. So sind Euklids »Elemente« keine 13-bändige Enzyklopädie, sondern ein Buch mit 13 Kapiteln, die man als »Bücher« bezeichnet (wie jene der Bibel).

Die Abbildungen des Buchs sind durchweg farbig und ansprechend; allerdings hätte des öfteren eine schematische Zeichnung anstelle eines Fotos dem Leser bessere Dienste geleistet. Weniger kann mehr, da weniger verwirrend sein. Deutlich wird dies beim Thema hyperbolische Geometrie, wo man eigentlich nur merkwürdig Verzerrtes zu sehen bekommt.

Insgesamt handelt es sich um ein anregendes und hochinteressantes Buch. Als Lehrbuch kann es nicht dienen, als Ergänzung und vor allem zur Motivation sehr wohl.

Klaus Volkert

Der Rezensent ist Professor für Didaktik der Mathematik an der Universität zu Köln.

PHYSIK

Leonard Mlodinow

Feynmans Regenbogen

Die Suche nach Schönheit in der Physik und im Leben

Aus dem Englischen von Michael Schmidt.
Reclam, Leipzig 2005. 204 Seiten, € 19,90

Ein genialer, viel versprechender Jungphysiker namens Leonard Mlodinow bekommt 1981 eine Zweijahresstelle an dem höchstrangigen Forschungsinstitut California Institute of Technology (Caltech) in Pasadena, mit der einzigen Verpflichtung, geniale Theorien zu produzieren. Im Büro nebenan sitzt Murray Gell-Mann, Physiknobelpreisträger von 1969. Als aber Mlodinow die erwarteten genialen Leistungen nicht erbringt, wird er in ein weniger prominentes Büro versetzt.

Von zwei frustrierenden Jahren bleibt als einziger Lichtblick die Begegnung mit dem anderen Büronachbarn Gell-Manns: Richard Feynman (1908–1988), Nobelpreisträger von 1965 für grundlegende Arbeiten in der Quantenelektrodynamik, Autor der legendären »Feynman Lectures in Physics« und zahlreicher populärer Bücher, der noch 1986 als Gutachter zur »Challenger«-Katastrophe Aufsehen erregte. »Some Time with Feynman« ist der Titel der einen von zwei englischen Ausgaben des Buchs, und der trifft den Inhalt besser als »Feynman's Rainbow«, den der deutsche Verlag übernommen hat.

Höchst amüsant ist das Werk durch die skurrilen Figuren innerhalb und außerhalb des Caltech. Wer die Szene der Elementarteilchenphysiker kennt, wird den einen oder anderen Kollegen trotz Verfremdung erkennen. Mlodinows besondere Aufmerksamkeit gilt einem jungen Professor, den er wegen der Pflanzenpracht in seinem Büro »Professor Gärtner« nennt und der seine Dauerstelle unmittelbar nach seiner sensationellen Doktorarbeit erhalten hatte – von dem danach aber nichts mehr gekommen ist, das des Caltech würdig gewesen wäre.

Auch Mlodinow selbst hat keine weiteren akademischen Weihen errrungen. Um sein Fortkommen müssen wir uns trotzdem nicht sorgen: Er hat sein Talent zu amüsanten, zugleich aber verständlichen und korrekten Beschreibungen physikalischer Sachverhalte als Autor der Fernsehserie »Star Trek« genutzt.

Bereits als Insiderbericht eines Außenseiters über eine abgeschlossene Welt besonderer Art ist das Buch lesenswert. Zudem stellt es im Vorübergehen schwierige Physik verständlich dar. Das Zentrum des Buchs aber bilden die wörtlich wiedergegebenen Dialoge des Autors mit Feynman, in denen sich dieser als überraschend nachdenklich, geradezu weise erweist. Nachdem Feynman festgestellt hat »Eigentlich weiß ich nur, was gut für mich ist« und »Psychologie ist ein Haufen Mist« folgt ein Privatissimum nach dem anderen über Feynmans Psychologie der Forschung, genauer über ihn als Forscher. »Spielen ist ein wichtiger Teil des schöpferischen Prozesses«, hört ihn Mlodinow sagen und »Ich habe meinen Platz in der Physik gefunden. Sie ist mein Leben. Mir macht Physik mehr Spaß als alles andere, sonst könnte ich mich nicht damit befassen«. Sieht man von der Physik ab, sagt Feynman in den Dialogen immer wieder dasselbe wie Suleika in Goethes »West-östlichem Divan«: »Höchstes Glück der Erdenkinder sei nur die Persönlichkeit.«

Die Übersetzung ist gut, auch in den physikalischen Teilen. Jedenfalls ist mir nur ein sinnentstellender Schnitzer – ein an falscher Stelle stehendes »nur« auf S. 94 – aufgefallen. Seltsam ist, dass die »Lektürevorschläge« am Ende Feynmans zwei bekannteste Bücher für das allgemeine Publikum nicht erwähnen: »Sie belieben wohl zu scherzen, Mister Feynman« und »Kümmert Sie, was andere Leute denken?« Die Außenwirkung, die er in diesen Büchern erreicht hat, strebte Feynman auch in seinen Dialogen mit Mlodinow an: Er wusste, dass dieser ihre Gespräche auf Tonband aufnahm, um sie in einem Buch zu verwerten.

Insgesamt habe ich die Lektüre in beiden Sprachen sehr genossen. Ich empfehle das Buch wegen des amüsanten und lehrreichen Einblicks, den es in eine Wissenschaftsenklave sowie das Denken des respektlosen und charismatischen großen Physikers Feynman gewährt.

Henning Genz

Der Rezensent ist pensionierter Professor für theoretische Physik an der Universität Karlsruhe. Sein Arbeitsgebiet ist die Theorie der Elementarteilchen.

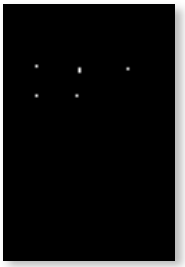
WISSENSCHAFTSSOZIOLOGIE

Peter Weingart

Die Wissenschaft der Öffentlichkeit

Essays zum Verhältnis von Wissenschaft, Medien und Öffentlichkeit

Velbrück, Weilerswist 2005. 206 Seiten, € 22,–



Wissenschaft genießt in den Medien eine wachsende Aufmerksamkeit, zu erkennen an der Vielzahl der Magazine und Sendereihen, die rings um dieses Thema hervorsprießen. Auf der anderen Seite suchen die Wissenschaftler verstärkt den Kontakt zu den Medien, weil ihnen seit geraumer Zeit ein Wind der Veränderung ins Gesicht bläst.

Nach Ansicht von Peter Weingart, Professor für Soziologie an der Universität Bielefeld, bröckeln die althergebrachten Züge des akademischen Stands. Konnten Naturforscher in vergangenen Zeiten in der Abgeschiedenheit ihrer Labore oder Denkerstuben relativ ungestört von der breiten Öffentlichkeit Neues ersinnen, fordert die demokratisch geprägte Gesellschaft nunmehr frühzeitig Rechtfertigung und Effizienz für jegliches Handeln, also auch für wissenschaftliches.

Unterstützung findet die Allgemeinheit in der Politik. So rief Bundesforschungsministerin Edelgard Bulmahn noch kurz vor Ende ihrer Amtszeit die Wissenschaft zur Aussprache mit der breiten Masse auf und verwies ausdrücklich auf die Initiative »Wissenschaft im Dialog«.

Die Wissenschaft, so Weingart, orientiert sich daher zunehmend an den Medien. Sie sollen als Mittler und »Multiplikatoren« für den Gedankenaustausch dienen. Daher schmückt sich heute jede Festveranstaltung einer renommierten Forschungsorganisation mit telegenen Moderatoren wie Ranga Yogeshwar oder Joachim Bublath.

Das bleibt nicht folgenlos, wie Weingart in der vorliegenden Aufsatzsammlung detailliert darlegt. Er bezeichnet sie als Essays, um auszudrücken, dass er sie nicht ausschließlich für die akademische Fachgemeinde schrieb. Dennoch wird ein Nichtsoziologe zuweilen ein Fremdwörterbuch zur Hand nehmen müssen; ein Kapitel ist zudem auf Englisch.

Den Gedanken des Autors zu folgen lohnt aber allemal. Er geht nicht nur auf die Wechselbeziehungen zwischen der Wissenschaft und den Medien ein, sondern ebenso auf die Vernetzung mit anderen gesellschaftlichen Gruppen, der Politik beispielsweise oder der breiten Öffentlichkeit. Der Rolle der Wissenschaft in Spielfilmen widmet er sogar ein eigenes Kapitel.

Ausgespart bleiben dagegen die Verstrickungen der Wissenschaft mit der Wirtschaft und der Industrie, die Weingart in »Die Stunde der Wahrheit? Zum Verhältnis der Wissenschaft zu Politik, Wirtschaft und Medien in der Wissensgesellschaft« (Velbrück, 2001) ausführlich beschrieben hat.

Doch trotz aller Anstrengungen kann sich die Forschergilde nicht sicher sein, ob sich die Öffnung vorteilhaft für sie auswirkt. Zumindest, so argumentiert der Autor, gebe es keine gesicherten Erkenntnisse darüber, wie sich deren derzeitige

mediale Präsenz in der Haltung der Öffentlichkeit zur Wissenschaft niederschlägt. Die naive Erwartung, dass ein gesteigertes Interesse gleichzeitig Vertrauen schaffe, widerlegt Weingart kurzerhand mit Untersuchungen zur Gentechnik.

Besonders beeindruckend beleuchtet der Verfasser die wechselseitige Abhängigkeit zwischen Wissenschaft und Politik. Der Erkenntnis »Wissen ist Macht« hat die Forschung wohl ihre gesellschaftliche Stellung zu verdanken. Um ihre Entscheidungen in einer immer komplexer werdenden Welt zu legitimieren, greifen die Gesetzgeber zunehmend auf das Urteil von Experten zurück. Dies ist zwar kein Muss für eine Staatsmacht. Es ist aber kaum vorstellbar, dass sich eine demokratisch gewählte Regierung an der Macht halten kann, wenn sie bei einer Schlüsselfrage gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse einfach beiseite schiebt und sich stattdessen für einen erkennbar irrationalen Weg entscheidet.

Gleichwohl steht Wissenschaft für die Suche nach der (absoluten) Wahrheit, nicht für deren Besitz. Daher gibt es zu jeder Fachmeinung in der Regel eine Gegenposition. Dies machen sich Politiker gern zunutze, wie Weingart dezidiert am Beispiel des wissenschaftlichen Disputs um den Aidskonflikt in Südafrika beschreibt.

Auch wenn Weingarts neues Buch nicht ganz an »Die Stunde der Wahrheit?« heranreicht, lohnt die Lektüre. Sie vergegenwärtigt allen, die sich für Wissenschaft begeistern oder an ihr teilhaben, die enge Verbindung zu anderen gesellschaftlichen Gruppen und hilft darüber hinaus, sich über die eigene Rolle Klarheit zu verschaffen.

Gerhard Samulat

Der Rezensent ist freier Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.

PSYCHIATRIE

Ulrich Hegerl, David Althaus, Holger Reiners

Das Rätsel Depression

Eine Krankheit wird entschlüsselt

C.H.Beck, München 2005. 254 Seiten, € 19,90

Ulrich Hegerl, Professor und Leitender Oberarzt an der psychiatrischen Universitätsklinik München, David Althaus, Diplompsychologe und Psychotherapeut, sowie Holger Reiners, Architekt, Unternehmensberater, Autor zahlreicher Bücher und selbst Betroffener, haben eine gute Idee gehabt: Aus ihren unterschiedlichen Erfahrungskontexten haben sie gemeinsam ein Buch über die »Krankheit Depression« geschrieben. Entstanden ist eine gut verständliche Darstellung, die ein ungewöhnlich vielseitiges Bild dieser Erkrankung gibt.

Das Erleben und Verhalten depressiv Erkrankter ist »normalpsychologisch« kaum einfühlbar. Daher bringen alle drei Autoren für dessen Beschreibung im ersten Kapitel besonderes Engagement auf, auch um die Erkrankten vor gut gemeinten, aufmunternden Ratschlägen zu schützen. Im Kapitel über die Entste- ▷

▷ hungsmodelle favorisieren die Autoren einen aktuellen biologischen Erklärungsansatz, wagen einen kurzen, aber interessanten Ausflug in die Neurobiologie des Gehirns und informieren durchaus akzeptierend, wenn auch nicht unkritisch über andere Erklärungsmodelle bis hin zur antiken Viersäftelehre.

Unter »Behandlungsformen« beschreiben die Autoren vorrangig die Medikamentenbehandlung unter Einschluss auch neuerer Antidepressiva. Die Psychotherapie der Depression wird recht differenziert behandelt, wobei auch Außenseitermethoden zur Sprache kommen. Hegerl, Althaus und Reiners verschweigen nicht, dass Selbstheilungstendenzen und der Placeboeffekt eine zuverlässige Beurteilung der Behandlungsmethoden sehr schwierig machen. Einige Überlegungen über das Verhältnis von Depression und Kunst, über den Grenzbereich, in dem künstlerisches Gestalten (noch) möglich ist, schließen diesen Abschnitt ab.

Depression ist lebensgefährlich: In Deutschland sterben durch Suizid anderthalbmal so viele Menschen wie durch Verkehrsunfälle. Entsprechend ausführlich gehen die Autoren auf dieses Problem ein. Ein anderes ebenfalls breit dargestelltes Thema ist das »Bündnis gegen Depression«: Durch ein Vier-Ebenen-Interventionsprogramm in Kooperation mit Hausärzten, einer breiten Öffentlichkeitsarbeit sowie durch Unterstützung der Selbsthilfe wurde die Versorgung depressiver Patienten so stark verbessert, dass beispielsweise in Nürnberg die Anzahl der Selbstmordversuche um mehr als 25 Prozent zurückging.

In vielen einzelnen Punkten hätte ich die Akzente anders gesetzt. So erscheint es zweifelhaft, ob die Krankheit Depression wirklich etwas qualitativ so Andersartiges ist als ein reaktiv depressives Zustandsbild. Die Autoren verfechten diese scharfe Trennung mit großem Eifer, vermutlich um die »echte« Depression als etwas Einzigartiges darzustellen, für dessen Verständnis besondere Bemühungen erforderlich seien. Nur erscheint damit unvermeidlich eine tiefe und anhaltende Trauer über ein traumatisches Erlebnis harmloser, als sie ist.

Ich glaube auch, dass man die Angehörigen nicht nur aufklären und ihnen sinnvolles Reagieren auf das Verhalten der Betroffenen nahe bringen sollte. Durch Einbeziehung systemischer Sichtweisen und Interventionen ließe sich erreichen, dass die Betroffenen die Veränderungsarbeit nicht alleine machen müssen. Aber diese und andere Randnotizen schmälern nicht den Wert dieses Buchs, das einen guten Überblick über das Thema Depression bietet.

Wilhelm Rotthaus

Der Rezensent war Leiter des Fachbereichs Psychiatrie und Psychotherapie des Kindes- und Jugendalters der Rheinischen Kliniken Viersen und ist Arzt für Kinder- und Jugendpsychiatrie in Bergheim bei Köln.

ZOOLOGIE

Carl Safina

Ein Albatros namens Amelia

Aus dem Leben eines Sturmvogels

Aus dem amerikanischen Englisch von Sebastian Vogel.
Marebuchverlag, Hamburg 2004. 520 Seiten, € 26,90

Was bringt einen Menschen dazu, immer wieder zu Forschungsreisen mit den allergrößten Strapazen aufzubrechen: Hitze, Moskito-Angriffe, Seekrankheit oder gar tiefgekühlte Unterwäsche? Es muss Liebe sein; Liebe zur Vielfalt des Lebens.

Mit Ehrfurcht, Achtung und vor allem Neugier ist Carl Safina den Wanderungen der Seevögel auf der Spur. Der amerikanische Umweltforscher und Verfasser von mehr als hundert wissenschaftlichen wie populären Werken hat sein Leben dem Schutz der Ozeane und ihrer Bewohner gewidmet. Das von ihm (mit-)gegründete und geleitete Blue Ocean Institute in New York (www.blueoceaninstitute.org/) verfolgt dieses Ziel mit »Wissenschaft, Kunst und Literatur«.

Safina begegnet der Heldin seines Buchs auf Tern Island, einer winzigen, unter Schutz stehenden nordwestlichen Hawaii-Insel. Nur wenige Schritte vor dem Außenposten der US-Behörde für Fischerei und Naturschutz sitzt Amelia, ein Weibchen aus der Familie der Laysan-Albatrosse, seit fast zwei Wochen auf ihrem Ei und hat die Welt um sich herum vergessen. Den kürbisfarbenen Schnabel unter einen Flügel gesteckt und die Augen geschlossen, döst sie »im Brutrausch«.

Mit etwa zehn mal sieben Zentimetern hat Amelias Ei die richtige Größe, und der Embryo wird durch die deutlich zu erkennenden Blutgefäße gut versorgt.

Um 1900 wurden Albatros-Eier zu Tausenden aus Laysan Island abtransportiert; die in ihnen enthaltenen Proteine dienten als Grundstoff für das Albumin-Druckverfahren.

Dieser Befund verhilft Amelia zu der Ehre, unter einigen Federn im Rückenbereich einen kleinen Sender tragen zu dürfen, der mit einem Satellitenortungssystem gekoppelt ist.

Albatrosse suchen zum Brüten die einsamsten Inseln auf und unternehmen zur Nahrungssuche Rundflüge von mehreren tausend Kilometern. Safina berichtet, dass ein 55 Jahre alter Albatros im Lauf seines Lebens mindestens sechs Millionen Kilometer geflogen ist. Ergreifend sind ihre Größe, ihr langes Leben und ihre extreme Ausdauer. »95 Prozent ihres gesamten Daseins verbringen sie auf dem Meer – den größten Teil davon im Flug.« Ihre Welt ist die des Windes und des wilden Wassers, das Land »ist kaum mehr als ein notwendiges Übel«.

Auch Amelia macht sich auf lange Reisen, nachdem ihr Küken geschlüpft ist. Während ihr Partner in der Nähe bleibt, fliegt sie auf der Suche nach Nahrung Tag und Nacht, im Schnitt mit einer Geschwindigkeit von 25 Kilometern pro Stunde. Nach der Rückkehr zum Brutplatz würgt sie ihrem Kind Reste von Tintenfischen und eine ölige, kalorienreiche Substanz aus ihrem Magen in den Schnabel. Die Strapazen an Land, die Fütterung und das Wachsen des Jungvogels kann Safina mit eigenen Augen beobachten, doch Amelias Wege über das Meer lassen sich nur per Ortungssystem nachvollziehen.

Die Winde mit ihren Düften, die Amelia um die Nase wehen, ihre Erinnerungen an ihren Brutplatz und den bitteren Geschmack der eisernen Haken, die an den von Fischern ausgelegten Langleinen hängen – das beschreibt der Autor so lebhaft und eindrucksvoll, als hätte er es selbst miterlebt. Nur die magere Bebilderung des Buchs lässt gewisse Zweifel aufkommen.

Doch Safina belässt es nicht bei der Schilderung, die er aus eigenen vielfältigen Beobachtungen und allerneuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen rekonstruiert hat; er untermauert sie mit Fakten über die massiven vom Menschen verursachten Bedrohungen weltweit. Neben den Langleinen mit etwa 1,1 Milliarden Haken im Jahr ist es vor allem Müll: Albatrosse pflegen alles zu fressen, was im Wasser treibt, weil Fischeier und andere Lebewesen daran haften – und sterben an verschluckten Kunststoffen, die zersplittern, Speiseröhre oder Magen blockie- ▷

▷ ren und innere Verletzungen verursachen. Allem Anschein nach ist der Hauptmüllsünder im Fernen Osten zu suchen: Von 109 Kunststofffragmenten, die im Rahmen einer wissenschaftlichen Studie in verendeten Laysan-Albatrossen identifiziert wurden, stammten 108 aus Japan.

Es geht auch anders. Jeder, der die Hawaii-Insel Laysan Island betreten will, ist verpflichtet, nagelneue Kleidungsstücke anzuziehen, die zudem mehrere Tage lang, bis unmittelbar vor ihrer Verwendung, eingefroren waren. Die aufwändige Prozedur dient der Wiederherstellung des natürlichen Gleichgewichts der Insel. Vor Jahren hatte ein Wissenschaftler ein Gras eingeschleppt, vielleicht als Samen am Schnürsenkel, das sich auf der Insel rasch ausbreitete und einheimische Gräser verdrängte. Bodenbrütende Vogelarten, die für den Nestbau auf genau diese Gräser angewiesen sind, waren daraufhin fast ausgestorben.

Das Anlegen tiefgefrorener Unterwäsche ist für Safina das Mindeste, was er für den Naturschutz tun kann. Seine Faszination für das Leben auf der Erde motiviert ihn, Verzicht zu üben und unvoreingenommen zu sein. Der tief beeindruckte Leser lässt sich davon anstecken. Er wird zwar nicht zum Weltverbesserer, bemisst aber den Wert des Lebens neu – mit dem Willen, im Kleinen wie Safina im Großen »Sorge zu tragen für die Seele der Welt«.

Nardine Löser

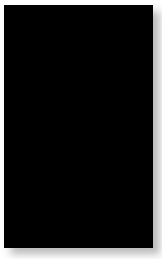
Die Rezensentin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Rostock.

THRILLER

Adam Fawer

Null

Aus dem Amerikanischen von Jochen Schwarzer, Frank Böhmert und Andree Hesse. Kindler, Reinbek 2005. 592 Seiten, € 19,90



Dies ist das erste Buch, das ich von Adam Fawer gelesen habe, aber bestimmt nicht das letzte. Das Fazit gleich vorweg: Es ist spannend, sehr lesbar und aufregend bis zum Schluss. Die wissenschaftlich angehauchten Passagen sind allesamt recht kurz gehalten, dennoch verständlich, und sie bringen gerade so viel Wissenschaft ein, wie nötig ist, um die Handlung zu verstehen.

Die Geschichte spielt sich im Umfeld von geheimer Forschung ab, mit Beteiligten aus diversen Geheimdiensten und Forschungslabors. Mit mehr oder – meistens – weniger legalen Mitteln wird die Wirkung bestimmer Stoffe auf Menschen und ihr Denken erprobt. Im Mittelpunkt der Handlung steht dabei David Caine, ein Mathematiker mit der besonderen Fähigkeit, Wahrscheinlichkeiten extrem schnell im Kopf auszurechnen. Dies bringt ihn dazu, um Geld zu spielen – viel Geld, wodurch die Sache ins Illegale abrutscht. Sein Pokerclub wird im Geheimen von der russischen Mafia betrieben.

Leider ist er auch Epileptiker, und mit einem durch einen Anfall versauten Pokerspiel fängt der Roman auch gleich mittendrin an. In Rückblenden erfährt man nach und nach die Hintergründe und die Vorgeschichte.

Da bei David Caine die gewöhnlichen Therapien nicht recht wirken, unterwirft er sich einer experimentellen Medikamentenbehandlung. Deswegen kann er nicht vor den Leuten fliehen, denen er das viele Geld aus dem verlorenen Spiel schuldet. Sehr eindrücklich machen die Schergen der russischen Mafia ihm seine Zahlungspflichten klar. Überhaupt geht es rabiat zu, vor allem gegen Ende, wenn skrupellose Forscher David foltern, um ihn und seinen Zwillingsbruder zur Kooperation zu zwingen – aber realistisch: Die Geschehnisse in Guantanamo zeigen, dass Folter in der realen Welt eher noch schrecklicher ist als hier beschrieben. Aber das ist ein anderes Thema.

Die zweite Hauptperson ist Nava Vaner, eine ehemals russische Agentin und Nahkampfexpertin. Sie hat bei einer Datenübertragung von gestohlenem Material an den nordkoreanischen Geheimdienst Pech, irgendeine Datei ist nicht lesbar. Auch sie ist jetzt in Schwierigkeiten: Woher die Datei noch einmal nehmen? Gerade als sie es versuchen will, wird sie von der CIA zum FBI versetzt, um gewisse Details über illegale Forschungen herauszufinden. Und sie hat keine 24 Stunden mehr, um die Nordkoreaner mit Informationen zu versorgen.

Diese Versetzung bringt Nava und David zusammen. Sie helfen sich an verschiedenen Stellen gegenseitig aus der Not. Denn David Caine findet heraus, dass er in seinen Anfällen in Wirklichkeit Ausblicke in die Zukunft erlebt. Natürlich ist das hochspekulativ, aber konsistent erzählt und »wissenschaftlich« fundiert, mit einer kunstvollen Verflechtung von Relativitätstheorie, Quantentheorie, Wahrscheinlichkeitstheorie und dem Viele-Welten-Modell, plus einem Quäntchen Metaphysik, damit alles zusammenpasst.

Auf den verschiedenen Verfolgungsjagden, die sich durch die ganze Geschichte hindurchziehen, hilft vor allem Davids Voraussicht, aber auch Navas Kampfgeschick den Protagonisten, immer wieder knapp zu entkommen. Sehr knapp in aller Regel. Je unwahrscheinlicher, desto besser, denn dank Davids seherischen Fähigkeiten werden auch fast unmögliche Fluchtpläne umsetzbar. An einem Abend hat David sogar ein wenig Geld und will seine Voraussicht einsetzen, um durch Glücksspiel noch etwas dazuzuverdienen. Und schon verliert er sich wieder in dieser Sucht und steht am Ende ohne alles da. Da die Russen ihre Verbindungen haben, folgt prompt eine Abreibung, weil er mit seinem Geld nicht erst seine Schulden bezahlt und dann auch noch eine chinesische Spielhölle aufsucht.

Weitere Details möchte ich aber jetzt nicht verraten, um die Spannung nicht zu verderben. Eigentlich ist das Buch bereits jetzt eine gute Drehbuchvorlage. Längen würde es in dem Film jedenfalls nicht geben, und für furiose Action ist gesorgt.

Gleich zu Beginn hat mich der Roman ziemlich an den »Neuromancer« von William Gibson erinnert, allerdings lässt die Ähnlichkeit später nach. Die visionäre Kraft von Gibson erreicht Fawer jedenfalls nicht. Dennoch ist das Buch eine spannende und fesselnde Lektüre.

Tobias Scheuer

Der Rezensent ist promovierter Mathematiker und Development Architect bei SAP in Walldorf.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Sudoku oder die einsamen Zahlen

Eine neue Krankheit befällt die Gehirne denkender Menschen und hat ein hohes Suchtpotenzial. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie den folgenden Artikel und fragen Sie Ihren Arzt oder Lebenspartner.

Von Jean-Paul Delahaye

Ein reines Logikspiel für eine einzige Person erobert binnen weniger Monate ganze Kontinente: Das war der unglaubliche Siegeszug des Rubik-Würfels, für den sich Anfang der 1980er Jahre Hunderte von Millionen von Menschen begeisterten. Es sieht ganz so aus, als würde sich diese Geschichte mit einem noch weniger materiellen, rein logischen Spiel wiederholen.

Angeblich ging damals in Konstruktionsbüros und Universitätsinstituten die Produktivität steil nach unten, weil die Leute ihre Finger nicht von den Rubik-Würfeln lassen konnten. Heute drohen Termine zu platzen und Beziehungen zu zerbrechen, weil die Leute unansprechbar über einem kleinen Quadrat mit ein paar Zahlen darin hängen. Es hat mich beträchtliche Überwindung gekostet, diesen Artikel zu schreiben. Hat mich mein Gewissen geplagt, weil ich dadurch der weiteren Verbreitung der Seuche Vorschub leiste? Mitnichten! Die Epidemie ist ohnehin nicht aufzuhalten. Das Problem war vielmehr, dass ich meine Sudokus ein Weilchen beiseite legen musste, um über Sudokus zu schreiben; und das war hart.

Die Regeln des Spiels sind geradezu aufreizend einfach. Ein quadratisches Schema aus 9 · 9 Feldern ist in neun Unterquadrate (»Kästchen«) zu je 3 · 3 Feldern unterteilt. In einige der 81 Felder sind zu Spielbeginn Zahlen zwischen 1 und 9 eingetragen. Nun gilt es, die leeren Felder, ebenfalls mit Zahlen von 1 bis 9, auszufüllen. Dabei darf keine Zahl zweimal in ein und derselben Zeile oder Spalte auftreten – und auch nicht zweimal in ein und demselben Kästchen. Die Anfangsbelegung der Felder sollte so sein, dass das Problem eine eindeutige Lösung hat. Im Bild unten sehen Sie vier Sudokus mit aufsteigender Schwierigkeit.

Einsame Zahlen

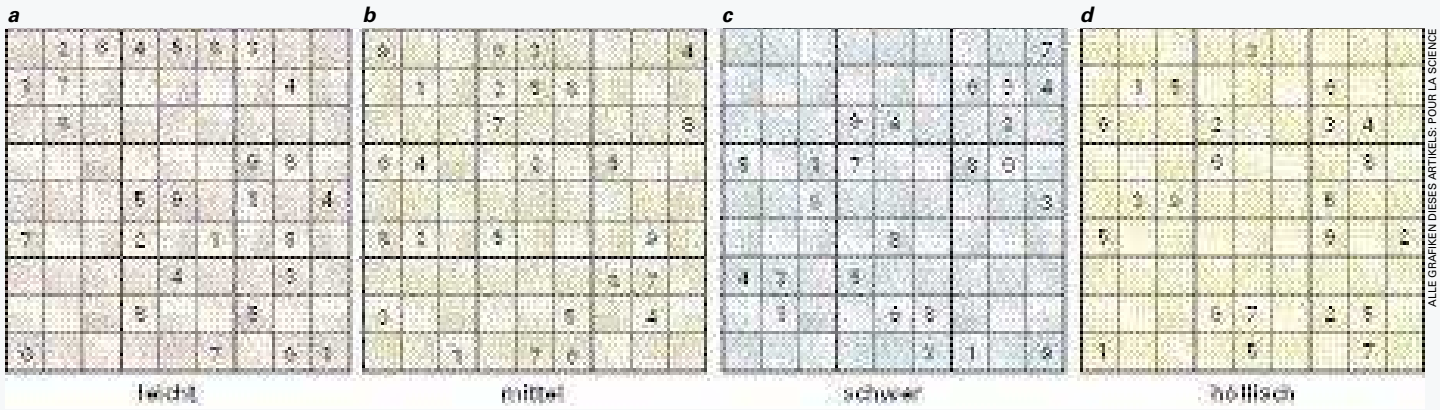
Die im Westen gebräuchliche Bezeichnung Sudoku leitet sich ab von japanisch *su* »Zahl« und *doku* »einzig«. Die Japaner selbst haben allerdings dem Spiel einen Namen gegeben, der für ihre Ohren exotisch klingt: »Number Place« (»Zahlenstelle«). Auch wenn ein Sudoku üblicherweise mit Zahlen geschrieben wird: Es gibt bei seiner Lösung nichts zu rechnen! Statt mit Zahlen könnte man die Felder des Sudoku auch mit neun anderen Symbolen ausfüllen: Buchstaben, Farben, kleinen Bildchen oder sonstigen Zeichen. Es handelt sich also um ein Kombinationsspiel; zu seiner Lösung braucht man nur strenges logisches Denken – und Geduld. Einige Lösungstechniken werden im Kasten auf S. 102/103 erläutert.

Die ersten Sudokus wurden im Mai 1979 auf S. 6 von Heft 16 der amerikanischen Zeitschrift »Dell Pencil Puzzles and Word Games« veröffentlicht. Ihr Autor Howard Garns, ein pensionierter Architekt, starb 1989 (oder 1981, die Quellen sind sich da nicht einig) in Indianapolis, ohne den weltweiten Erfolg seines Spiels erlebt zu haben. Garns wie auch die anderen Autoren der ersten Sudokus erzeugten ihre Aufgaben von Hand.

Von den Vereinigten Staaten wanderte das Spiel zunächst nach Japan, wo es seinen heute – im Westen – gebräuchlichen Namen erhielt. Den aktuellen Publikumserfolg verdankt es Wayne Gould, einem neuseeländischen Richter im Ruhestand, der in Hongkong lebt. Er schrieb ein Programm, das Anfangsspielsituationen automatisch erzeugt. Ende 2004 begann die »Times« seine Sudoku-Probleme regelmäßig zu veröffentlichen; im Januar 2005 zog der »Daily Telegraph« nach. Seither sind Dutzende von Zeitungen in aller Welt dazu übergegangen, Sudoku-Aufgaben abzudrucken. Manche bringen sie sogar auf der Titelseite und nutzen sie als Verkaufsargument. Zeitschriften und Bücher, die sich speziell dem Spiel widmen, folgten.

Alle, die sich an diesem Spiel versuchen, finden schnell Gefallen an ihm; gelegentlich werden sie so besessen davon,

Vier Sudokus unterschiedlicher Schwierigkeit zum Angewöhnen. Lösungen auf S. 106



ALLE GRAFIKEN DIESES ARTIKELS: POUR LA SCIENCE

Dieses Sudoku mit nur 17 Vorgaben gibt ausreichend Anlass zum Grübeln. Es ist eindeutig lösbar! Lösung auf S. 106

dass sie nicht mehr aufhören können. Seien Sie vorsichtig mit Ihrer Zeitplanung: Im Internet finden Sie mehr Aufgaben, als Sie jemals lösen können! Über die üblichen Stadien Gewöhnung und Abhängigkeit entwickelt sich die Sudokumanie zu einer veritablen Sucht – der auch ich vorübergehend erlegen bin.

Das süße Gift des Teilerfolgs

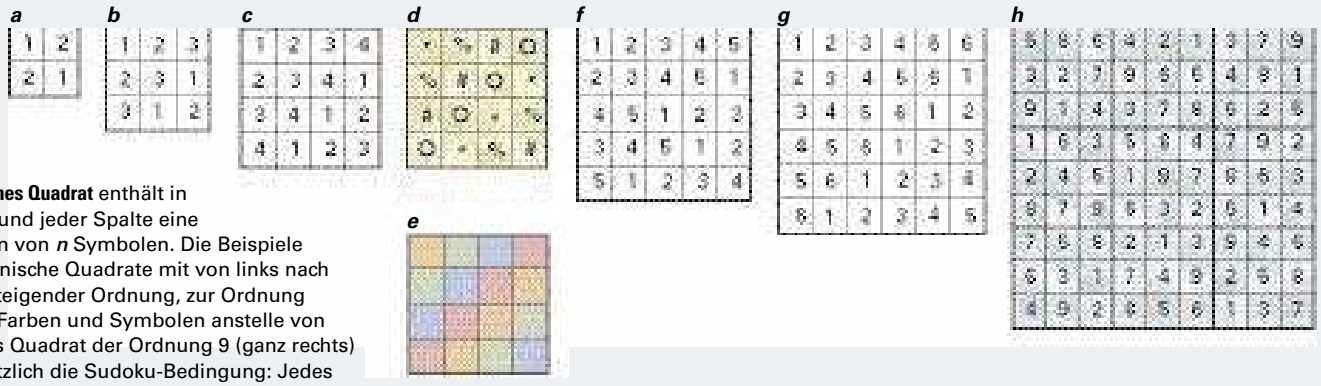
Ein wesentlicher Suchtfaktor ist zweifellos die Art und Weise, wie sich die Partien entwickeln. Am schwierigsten ist es, die ersten Zahlen zu setzen. Mit jedem ausgefüllten Feld kommt man der Lösung näher, und im weiteren Verlauf legt das Spiel auch an Tempo zu. Gelegentlich aber bleibt man stecken, obwohl nur noch wenige Felder frei sind. So kurz vor dem Ziel zu scheitern – diese Frustration tut man sich nicht an! Vielmehr verdoppelt man seine Mühen: »Wer ist stärker? Ich oder dieses lumpige Zahlenquadrat?« In diesem Stadium ist von jeder Störung des Spielers dringend abzuraten. Gelingt es ihm schließlich, das Spielfeld vollständig auszufüllen, so überströmt ihn ein solches Glücksgefühl, dass er sich alsbald an das nächste Sudoku macht. Der Übungsgewinn verstärkt das Erfolgserlebnis und die Abhängigkeit, bis der Süchtige nachts von den Zahlen in den kleinen Feldern träumt.

Sudoku bietet ein gutes Training im abstrakten Denken. Im Mathematikunterricht kann es der reinen Logik Attraktivität verleihen. Und wenn eine ganze Klasse sudokusüchtig wird – den Lehrer wird es freuen, denn die Schüler sind so ruhig wie nie.

Manche Leute behaupten, Sudokuspielen halte das Fortschreiten der Alzheimer-Krankheit auf. Ich bin nicht sicher, ob das ernst zu nehmen ist; aber zweifellos beschäftigt die kombinatorische Denkarbeit eine große Anzahl an Neuronen und hält das Gehirn durch intensives Training frisch und munter.

Der nächste Verwandte des Sudoku ist nicht, wie manchmal behauptet wird, das magische Quadrat. Da sind zwar auch Zahlen nach gewissen Regeln in die Felder eines quadratischen Schemas zu schreiben; aber ansonsten haben die beiden nicht viel miteinander gemein. Viel- ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



Ein lateinisches Quadrat enthält in jeder Zeile und jeder Spalte eine Permutation von *n* Symbolen. Die Beispiele zeigen lateinische Quadrate mit von links nach rechts aufsteigender Ordnung, zur Ordnung 4 auch mit Farben und Symbolen anstelle von Zahlen. Das Quadrat der Ordnung 9 (ganz rechts) erfüllt zusätzlich die Sudoku-Bedingung: Jedes 3·3-Kästchen enthält die Zahlen von 1 bis 9.

Wie löst man ein Sudoku?

Die besten Lösungsverfahren sind diejenigen, die man durch beständiges Üben selbst entwickelt. Sudoku bietet Raum für die Entfaltung eines persönlichen Geschmacks: Im Allgemeinen gibt es in jedem Stadium des Lösungsprozesses mehrere Möglichkeiten, ein weiteres Feld mit der richtigen Zahl zu füllen. Wir beschreiben hier vier häufig verwendete Methoden.

1) Das erzwungene Feld: Zu einem fest gewählten Feld betrachten wir die anderen Felder in derselben Zeile, derselben Spalte und im selben Kästchen. Wenn an diesen Stellen bereits acht verschiedene Zahlen vorkommen, muss zwangsläufig im ausgewählten Feld die neunte stehen.

Das gilt zum Beispiel für die Felder mit den roten Punkten in dem oben stehenden Bild. Mit dieser Methode lassen sich in bereits gut gefüllten Sudokus rasch die letzten Felder besetzen. Ein einfacher Spezialfall liegt vor, wenn in einer Klasse noch genau ein Feld frei ist (»Klasse« sei der Oberbegriff für Zeile, Spalte und Kästchen). Dagegen ist mit der Methode in einem noch dünn besetzten Gitter kaum etwas auszurichten.

2) Die erzwungene Zahl: Wir betrachten eine bestimmte Zahl, beispielsweise die Fünf. Im abgebildeten Beispiel kommt sie sowohl in der ersten als auch in der dritten Spalte schon vor, nicht aber in der zweiten. Wo in dieser Spalte könnte die Fünf stehen?

Nicht in den ersten drei Feldern dieser Spalte, denn das Kästchen links oben enthält bereits eine Fünf. Mit derselben Begründung schließt das Kästchen links unten die letzten drei Felder der zweiten Spalte aus. Also muss die Fünf der zweiten Spalte in einem der Felder 4, 5 oder 6 stehen. Davon ist nur eines noch frei: Folglich steht eine Fünf im fünften Feld. Mit Überlegungen dieser Art lassen sich die mit schwarzen Punkten markierten Felder in der Abbildung füllen.

Die Methoden 1 und 2 ergänzen sich: Jedes gefüllte Feld engt die Auswahl weiter ein und schafft damit neue Anwendungsmöglichkeiten. Bei einfachen und mittelschweren Sudokus kommt man auf diese Weise ziemlich rasch voran oder sogar zum Ziel.

3) Aufzählen und Ausdünnen: Diese Methode ist außerordentlich effizient, erfordert allerdings Bleistift und Radiergummi (oder äquivalente Mittel auf dem Computer). In jedes Feld trägt man in kleiner Schrift diejenigen Zahlen ein, die überhaupt noch möglich sind, das heißt nicht schon in derselben Zeile, derselben Spalte oder demselben Kästchen vorkommen (Bild rechts). Einige Spieler stellen die Zahlen lieber durch kleine Punkte in den Feldern dar, entsprechend der Anordnung in einer Telefontastatur: Ein Punkt links oben bedeutet eine Eins, einer in der Mitte oben eine Zwei und so weiter.

Aus dem so gewonnenen Gesamtbild kann man eine Fülle von Schlüssen ziehen, zum Beispiel folgende (Bild rechts): In der dritten Spalte sind für die Felder 2 bis 6 der Reihe nach noch folgende Zahlen möglich: {2, 3, 6, 7}, {3, 6, 9}, {2, 6}, {2, 6} und {6, 7}. Die Spalte muss eine Zwei und eine Sechs enthalten; diese stehen folglich zwangsläufig in den beiden Feldern 4 und 5, denn diese Felder könnten sonst nicht mehr korrekt gefüllt werden. Wir wissen zwar noch nicht, auf welchem der beiden Felder die Zwei und auf welchem die Sechs steht, aber beide stehen mit Sicherheit auf keinem anderen Feld dieser Spalte und können damit bei den anderen Möglichkeiten gestrichen werden. Damit vereinfachen sich die Belegungsmöglichkeiten folgendermaßen: {3, 7}, {3, 9}, {2, 6}, {2, 6}, {7}. Das ist aber noch nicht alles: Die Neun hat nur einen möglichen

▷ mehr stammt das Sudoku von einem so genannten lateinischen Quadrat ab. Das ist ein Quadrat mit n^2 Feldern, die mit n Symbolen auszufüllen sind derart, dass kein Symbol zweimal in einer Zeile oder Spalte auftritt; folglich wird jedes der n Symbole genau n-mal verwendet. Ihr Ursprung liegt im Mittelalter. Leonhard Euler (1707–1783) studierte sie intensiv und gab ihnen ihren heutigen Namen. Es gibt nur 3 lateinische Quadrate der Seitenlänge 3, aber schon 576 der Seitenlänge 4 und 5 524 751 496 156 892 842 531 225 600 der Seitenlänge 9. Wenn man lateinische Quadrate, die durch einfache Operationen wie die Vertauschung zweier Zeilen oder zweier Spalten auseinander hervorgehen, als gleich ansieht, beträgt die Anzahl der lateinischen Quadrate mit Seitenlänge 9 nur noch 377 597 570 964 258 816, wie Stanley E. Bammel und Jerome Rothstein 1975 bewiesen haben.

Im Jahr 1979 hat J. R. Nechvatal eine allgemeine und ziemlich komplizierte Formel für die Anzahl $L(n)$ der n-seitigen lateinischen Quadrate gefunden. Aber weder aus dieser Formel noch aus anderen, die man kennt, geht hervor, wie stark $L(n)$ mit wachsendem n ansteigt.

Wie viele Lösungen gibt es?

Ein vollständig ausgefülltes Sudoku ist per definitionem ein lateinisches Quadrat der Seitenlänge 9 mit der zusätzlichen Eigenschaft, dass jedes der 3·3-Kästchen die Zahlen von 1 bis 9 genau einmal enthält; also gibt es weniger Sudoku-Lösungen als lateinische Quadrate der Seiten-

Ein Sudoku kann bis auf 4 Plätze gefüllt sein (links) und immer noch zwei verschiedene Lösungen zulassen (rechts). Allgemein gilt: Wenn die Ecken eines Rechtecks, von dem eine Seite gänzlich in einem Kästchen liegt, nach dem Muster $\begin{smallmatrix} a & b \\ b & a \end{smallmatrix}$ mit Zahlen belegt sind, darf man diese Belegung durch $\begin{smallmatrix} b & a \\ a & b \end{smallmatrix}$ ersetzen, ohne eine Sudoku-Regel zu verletzen.

Platz (was man auch mit Methode 2 hätte finden können, was aber so systematischer gelingt); nachdem sie ihn einnimmt, bleibt für die Drei nur noch einer übrig, und dadurch ist auch die Position der Sieben erzwungen. Letztlich engen sich die Möglichkeiten ein auf {3}, {9}, {2, 6}, {2, 6}, {7}. Nur die Positionen der Zwei und der Sechs bleiben unbestimmt.

Die Überlegungen, die wir hier für Spalte 3 durchgeführt haben, kann man für jede Zeile, jede Spalte und jedes Kästchen anstellen. Das macht insgesamt 27 Gelegenheiten zum Ausdünnen. Da jedes Feld zu drei Klassen gehört, wirkt sich jede Ausdünnung seiner Möglichkeitsmenge auch hilfreich in den jeweils anderen Klassen aus.

Allgemein formuliert lautet die Ausdünnungsregel: Findet man unter den möglichen Belegungen einer Klasse *m* Mengen, die ausschließlich *m* Zahlen enthalten und keine anderen, so kann man diese *m* Zahlen bei den Möglichkeiten für die restlichen Felder dieser Klasse streichen. Nicht alle *m* Zahlen müssen in allen *m* Mengen enthalten sein: Die Möglichkeitsmengen {3, 5}, {3, 8} und {5, 8} schließen die Möglichkeiten 3, 5 und 8 für jedes andere Feld der Klasse aus.

Übungsbeispiele gefällig? Vereinfachen Sie so weit wie möglich die folgenden Möglichkeitsserien:
a) {1}, {1, 2}, {2, 3, 4}, {1, 2, 3, 4, 5}, {1, 2, 4}
b) {2, 3}, {2, 5}, {3, 5}, {2, 3, 5, 7, 8, 9}, {7, 9}, {2, 5, 7}.
Mit Hilfe dieser drei Methoden lassen sich recht viele Sudoku-Gitter lösen, darunter auch einige, die als schwer oder höllisch eingestuft werden.

4) Versuch und Irrtum: Manchmal hilft nichts als Probieren. Diese Methode ist recht mühsam und erfordert wahlweise
- sehr hohe Konzentration,
- Buntstifte,
- einen reichlichen Vorrat an kariertem Papier oder
- ein Lösungsprogramm für Sudokus, bei dem man gewisse Einträge in die Felder und sämtliche Folgeeinträge wieder gezielt löschen kann. Bei höllischen Sudokus kommt man häufig um diese harte Methode nicht herum.

Nehmen wir an, die Ungewissheit über die Belegung von Feld 4 und 5 der Spalte 3 – muss es nun 2, 6 oder 6, 2 heißen? – sei nicht aufzulösen. Dann trägt man versuchsweise die Sechs in das erste Feld ein und leitet daraus alle möglichen Folgerungen ab. Stößt man hierbei auf einen Widerspruch, so folgt, dass die Sechs nicht dort stehen kann, wo man sie vermutet hat. Also gehört dorthin die einzige Alternative, nämlich die Zwei. Ergibt sich kein Widerspruch, so ist die Lösung gefunden (diese ist nämlich eindeutig). Die Methode von Versuch und Irrtum beruht somit auf einem Widerspruchsbeweis.

Häufig landet man jedoch weder bei einem Widerspruch noch bei einer Lösung, sondern bei einer weiteren unauflöslichen Ungewissheit. Dann muss man eine weitere Vermutung anstellen; wenn sich diese als falsch erweist, muss man genau bis zu dem Punkt der letzten Vermutung zurückgehen und die alternative Vermutung verfolgen. Dieses »backtracking« ist relativ einfach zu programmieren; es mit Bleistift und Papier zu praktizieren, fällt unserem beschränkten Gedächtnis sehr schwer.

Weitere Techniken finden sich im Internet.

Lösung: a) {1}, {2}, {3}, {5}, {4}
b) {2, 3}, {2, 5}, {3, 5}, {8}, {9}, {7}

länge 9. Ihre genaue Anzahl anzugeben ist schwierig. Bertram Felgenhauer von der Technischen Universität Dresden und Frazer Jarvis von der Universität Sheffield sind mit einer Kombination aus Nachdenken – um das Problem zu vereinfachen – und erschöpfender Suche mit Hilfe des Computers auf die Zahl 6 670 903 752 021 072 936 960 gekommen. Dabei werden Lösungen, die durch einfache Operationen wie Drehungen, Spiegelungen oder kästchentreue Permutationen der Zeilen und Spalten auseinander hervorgehen, als verschieden gezählt. (Eine Permutation heißt »kästchentreu«, wenn sie Kästchen als ganze intakt lässt, auch wenn sie deren Inhalt möglicherweise umsortiert. Zum Beispiel darf eine kästchentreue Spaltenpermutation die erste Spalte nur in die zweite oder dritte, nicht aber in eine andere Spalte bewegen, weil sonst die linken Kästchen zerrissen würden.) Ed Russell kam unabhängig zum selben Ergebnis, was für eine so komplizierte Beweisführung eine willkommene Bestätigung liefert.

Zählt man dagegen alle Lösungen, die sich nur durch die genannten elementaren Operationen unterscheiden, als eine, so bleiben nur 5 472 730 538 wesentlich verschiedene Anordnungen übrig: etwas weniger, als es Menschen auf der Erde gibt. Das scheint verglichen mit den riesigen Zahlen zuvor relativ wenig zu sein; aber ein Mangel an Problemen ist nicht zu befürchten. Selbst wer pro Minute ein Sudoku lösen würde, könnte in einem hundertjährigen Leben nur knapp ein Prozent aller denkbaren Anordnungen abarbeiten.

Und wie viele Aufgaben?

Und das sind nur die vollständig ausgefüllten Sudokus! Aus einer solchen »Lösung« entsteht eine »Aufgabe«, indem man gewisse Felder ausradiert, bis nur noch ungefähr ein Drittel übrig bleibt. Dabei muss der Aufgabensteller darauf achten, dass die Lösung aus der Aufgabe eindeutig rekonstruierbar bleibt: Lässt er zu viele Felder weg, gibt es mehrere Lösungen zur selben Aufgabe. Lässt er zu wenige weg, macht er die Aufgabe einfacher und vielleicht auch langweiliger.

Bisher ist es niemandem gelungen, die Anzahl der denkbaren Aufgaben (Anfangsbelegungen) zu einer Lösung zu bestimmen. Es gibt einfach zu viele Möglichkeiten, Felder auszuradieren – und vielleicht ist die Bestimmung ihrer Anzahl auch der Mühe nicht wert. Interessanter ist die Frage, wie viele minimale Anfangsbelegungen es gibt, das heißt solche, aus denen man keine Zahl mehr löschen kann, ohne die eindeutige Lösbarkeit zu verlieren. Auch diese Zahl ist bislang unbekannt; aber sie wird es wohl nicht mehr lange bleiben.

Ein weiteres Problem ist bis heute ungelöst: Welches ist die kleinste Anzahl von Zahlen, die man in ein Sudoku-Quadrat setzen muss, damit die Lösung eindeutig wird? Man kennt zahlreiche Belegungen mit 17 Zahlen, die eine eindeutige Lösung erzwingen (Bild S. 101), und keine einzige mit dieser Eigenschaft und nur 16 Einträgen. Dass andererseits 16 Zahlen niemals für die Eindeutigkeit ausreichen, hat auch noch niemand beweisen können.

Dagegen kennen wir die Lösung des folgenden Problems: »Wie viele Zahlen kann man maximal vorgeben, ohne dass die Lösung eindeutig ist?« Es ist nämlich ▷

PREISRÄTSEL

Ein höllisches Sudoku

von Web Sudoku Services
(www.websudoku.com)

Füllen Sie in dem nebenstehenden Schema die leeren Felder so mit den Zahlen 1 bis 9, dass in jeder Zeile, jeder Spalte und jedem 3·3-Teilkästchen jede Zahl genau einmal vorkommt.

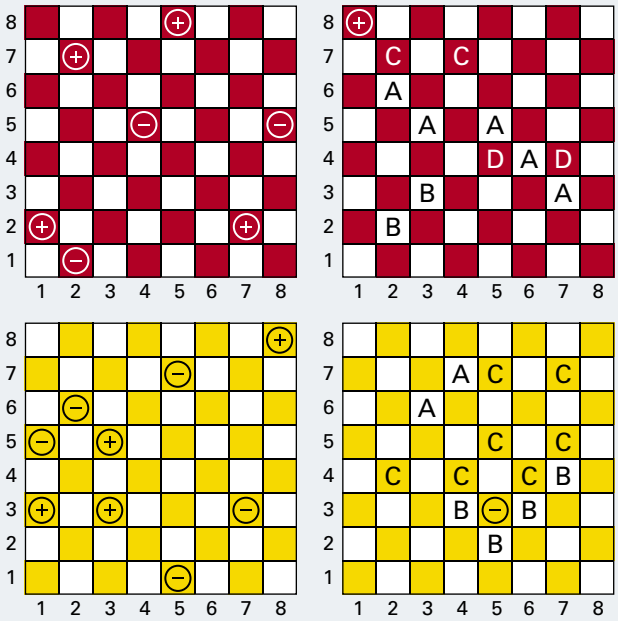
Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, oder reichen Sie Ihre Lösung online unter www.spektrum.de/sudoku ein.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Computerspiele »Sudoku« mit LCD-Display (siehe Abbildung rechts). Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 14. März 2006, eingehen.

	1			6	5	4		
				8	4	1		
4							7	
	5		1	9				
		3				7		
				3	7		5	
	8							3
		2	6	5				
		9	8	1			2	

Das Computerspiel (inklusive Batterien und deutscher Gebrauchsanleitung) ist auch im Shop von Lutz Friebel unter http://gymnastikball.yatego.de oder per E-Mail an sudoku-pc-spiel@t-online.de zum Sonderpreis von 19,90 € (plus 5,10 € Porto für ein versichertes Paket) erhältlich.

Lösung zu »Quarkon und Antiquarkon« (Januar 2005)



Professor Heisinger fixierte das Quarkon auf der Gitterposition (1/8) und das Antiquarkon auf (5/3).

Bernd Rümmler aus Göttingen färbte die Felder des Gitters wie ein Schachbrett abwechselnd rot und gelb. Setzt sich auf das so gefärbte Gitter ein beliebiges Neutronium-Molekül ab, so kommen dessen Quarkonen und Antiquarkonen entweder nur auf rote oder nur auf gelbe Felder zu liegen. Da ein Molekül niemals gleichzeitig die Verhältnisse für rote wie gelbe Felder verändert, kann der ganze Vorgang jeweils für die Felder einer Farbe allein betrachtet werden.

Die beiden linken Abbildungen oben zeigen die morgendliche Situation getrennt nach der Farbe. Wir berechnen nun für jedes Teilgitter eine Zustandsgröße: Der »Urort« eines Teilgitters ist gleich der (Vektor-)Summe der Positionen der Quarkonen minus der Summe der Positionen der Antiquarkonen. Für das rote Gitter ergibt sich der Urort (1/8) und für das gelbe Gitter der negative Urort –(5/3). Also muss das Quarkon auf (1/8) gesessen haben und das Antiquarkon auf (5/3).

Warum? – Der Urort ist eine wichtige Erhaltungsgröße der Quarkonenphysik. Setzt sich nämlich ein beliebiges Neutronium-Molekül auf einem Gitter ab, so bleibt dessen Urort unverändert. Das gilt auch dann, wenn das Neutronium mit bereits vorhandenen Quarkonen und Antiquarkonen reagiert. Beides ist leicht nachzurechnen. Andererseits: Wenn man genau ein Quarkon oder Antiquarkon auf einem Teilgitter fixiert, ist der Urort des Gitters gleich der Position dieses Teilchens – mit negativem Vorzeichen für das Antiquarkon.

Bleibt noch zu zeigen, dass es wirklich eine Abfolge von Reaktionen mit Neutronium gibt, welche die abendliche Anordnung in die morgendliche überführt. Eine von vielen Möglichkeiten ist für beide Farben getrennt im rechten Teilbild aufgezeichnet. Die Buchstaben bezeichnen dabei das Zentrum des jeweiligen Neutroniums. Dabei spielt die Reihenfolge des Absetzvorgangs keine Rolle.

Die Gewinnerin des Gutscheins »BestChoice« ist Birgit Brüdigam, Uetersen.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

▷ offensichtlich, dass im Fall von 78, 79 oder 80 Zahlen die Lösung eindeutig ist, falls sie existiert. Andererseits erzwingen 77 Zahlen nicht in jedem Fall die Eindeutigkeit (Bild S. 102 unten).

Die Seitenlänge 9 ergibt zwar Aufgaben mit dem richtigen Schwierigkeitsgrad – nicht zu langweilig und nicht zu schwer –, ist aber ansonsten keineswegs zwingend. Man könnte Sudoku auch auf einem $4 \cdot 4$-Quadrat mit vier Kästchen der Größe $2 \cdot 2$ spielen oder auf einem Quadrat der Seitenlänge 16, 25, … Allgemein wird ein Quadrat mit der Seitenlänge n^2 in n^2 gleich große Kästchen der Größe $n \cdot n$ unterteilt. Man gibt sich n^2 verschiedene Symbole vor und verlangt, dass in keiner Zeile, keiner Spalte und in keinem Kästchen dasselbe Symbol mehr als einmal auftritt.

Vor Kurzem haben Takayuki Yato und Takahiro Seta bewiesen, dass das so definierte $n^2 \cdot n^2$-Sudoku ein NP-vollständiges Problem ist. Das heißt: Einerlei wie geschickt man ein Programm zur Lösung des verallgemeinerten Sudoku schreibt, seine Rechenzeit steigt mit wachsendem n so rasch an, dass bereits für mäßige n die schnellsten Computer der Welt überfordert wären. Dieses Resultat war nicht unbedingt das, was man erwartet hatte – und es mag denjenigen, die an dem »harmlosen« Fall $n = 3$ zu verzweifeln drohen, ein schwacher Trost sein.

Geordneter Rückzug

Es ist relativ einfach, ein Computerprogramm zu schreiben, das jedes beliebige Standard-$(9 \cdot 9)$-Sudoku löst oder seine Unlösbarkeit nachweist. Auf solchen Programmen beruhen, wie wir später sehen werden, die Programme zur automatischen Erzeugung von Sudoku-Aufgaben.

Mehrere Methoden sind denkbar; die gängigste ist als erschöpfende Suche mit geordnetem Rückzug *(backtracking)* zu beschreiben. Die Idee ist folgende: Das Programm setzt in das erste leere Feld die Zahl 1. Ist diese Entscheidung mit den Regeln verträglich, setzt es in das zweite leere Feld eine Eins, dann in das dritte, und so weiter. Bemerkt das Programm eine Regelverletzung (was sehr schnell vorkommt), so erhöht es die zuletzt gesetzte Zahl um 1 und beginnt von Neuem. Entdeckt es bei dem Versuch, die zuletzt platzierte Zahl um 1 zu erhöhen, dass diese eine 9 ist (die man ja nicht durch eine 10 ersetzen kann!), so geht es weiter zurück, erhöht die als vorletzte gesetzte Zahl um eine Einheit und macht von da aus weiter. Es ist wie beim Kilometerzähler: Wenn ein Rädchen über die Neun hinaus zählen soll, setzt es sich selbst auf Null und bewegt das linke Nachbarrädchen eins weiter. Gelegentlich, etwa beim Übergang von …999 auf …000, geht das Programm mehrere Schritte auf einmal zurück.

So wie ein Kilometerzähler sämtliche Kombinationen von Ziffern ohne Ausnahme durchläuft, so untersucht auch diese Methode erschöpfend alle Möglichkeiten und findet folglich sämtliche Lösungen. Wenn allerdings das Zählwerk in den ersten Ziffern unserer gedachten Kilometerzahl einen Widerspruch findet, probiert es die letzten Ziffern gar nicht erst durch. Das macht die Laufzeiten der Programme erträglich.

In einer auf Logik spezialisierten Programmiersprache wie Prolog, die in den 1970er Jahren in Frankreich von Alain Colmerauer und Philippe Roussel entwickelt wurde, ist die Lösung eines Sudoku mit Backtracking relativ kurz (wenige hundert Zeilen), elegant und effizient zu formulieren.

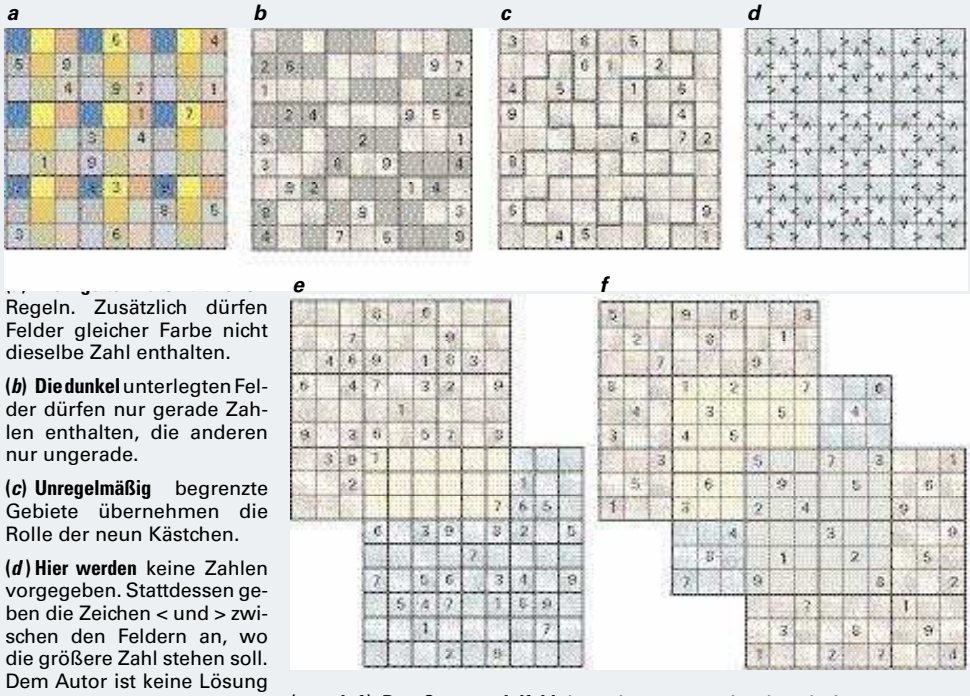
Dieses noch relativ primitive Programm lässt sich verbessern, insbesondere durch eine Technik namens *constraint propagation* (etwa: Verbreitung von Nachrichten über Beschränkungen). Das Programm führt für jedes Feld Buch darüber, welche Werte bei der aktuellen Belegung noch zulässig sind, und aktualisiert dieses Verzeichnis mit jeder neuen Setzung einer Zahl (entsprechend der Methode 3 im Kasten S. 102/103). Beim Backtracking muss es natürlich auch diese Tabelle auf den alten Stand zurücksetzen. Auf noch nicht besetzten Feldern probiert es nur noch die Zahlen durch, die nach der Tabelle zulässig sind.

Scharfsinn statt Backtracking

Dem menschlichen Denken laufen Backtracking-Techniken allerdings zuwider: Sie erfordern eine unglaubliche Geduld und Konzentration. Menschliche Spieler ziehen es vor, eine Vielfalt raffinierter Regeln anzuwenden, und greifen auf *trial and error* (Methode 4) samt Backtracking nur im Notfall zurück.

Es wurden auch Programme geschrieben, die der menschlichen Vorgehensweise genauer nachempfunden sind. Sie sind im Programmtext länger als die anderen, aber ebenfalls effizient. Der Aufwand, den sie zur Lösung eines Sudoku-Problems betreiben, dient den Verfassern der Aufgabe dazu, ihren Schwie- ▷

Sudoku-Varianten



Regeln. Zusätzlich dürfen Felder gleicher Farbe nicht dieselbe Zahl enthalten.

(*b*) **Die dunkel** unterlegten Felder dürfen nur gerade Zahlen enthalten, die anderen nur ungerade.

(*c*) **Unregelmäßig** begrenzte Gebiete übernehmen die Rolle der neun Kästchen.

(*d*) **Hier werden** keine Zahlen vorgegeben. Stattdessen geben die Zeichen < und > zwischen den Feldern an, wo die größere Zahl stehen soll. Dem Autor ist keine Lösung für dieses Rätsel bekannt, das 1999 in der Zeitschrift »Puzzler« erschienen ist.

(*e* **und** *f*) **Das Gesamtspielfeld** besteht aus zwei oder drei überlappenden Quadraten. Für jedes dieser Quadrate gelten die üblichen Regeln.

Lösungen

Sudokus von S. 100/101

Sudoku im Dürerbild

7	4	8	6	2	4	3	1	5
3	1	6	8	9	5	2	4	8
2	5	4	3	1	6	9	7	9
1	2	9	5	8	7	4	6	3
5	8	3	2	4	1	7	5	6
4	6	7	9	3	5	1	8	2
8	4	2	3	6	8	5	3	7
9	3	1	7	5	2	8	6	4
6	7	5	4	6	3	6	2	1

a

9	2	6	4	5	8	3	1	7
1	7	3	9	6	2	8	4	5
4	8	5	1	7	3	2	6	9
5	6	1	7	3	4	9	8	2
8	3	2	5	9	6	1	7	4
7	9	4	2	8	1	6	5	3
2	1	9	6	4	5	7	3	8
3	4	7	8	1	9	5	2	6
6	5	8	3	2	7	4	9	1

b

9	5	6	6	3	1	7	2	4
7	1	4	2	5	8	9	6	3
2	3	6	7	9	4	1	5	8
6	4	3	8	2	9	5	1	7
1	9	5	4	6	7	3	8	2
8	2	7	5	1	3	4	9	6
5	8	9	3	4	2	8	7	1
3	7	2	1	8	5	6	4	9
4	6	1	9	7	6	2	3	5

c

8	2	4	3	5	6	9	1	7
7	9	5	6	1	2	8	3	4
1	6	3	9	4	7	5	2	8
5	4	1	7	3	9	6	8	2
6	8	9	1	2	4	7	5	3
3	7	2	6	8	5	4	9	1
4	3	8	5	9	1	2	7	6
9	1	7	2	6	8	3	4	5
2	5	6	4	7	3	1	8	9

d

2	7	4	5	3	6	1	9	8
3	1	5	4	8	9	6	2	7
6	9	8	2	1	7	3	4	5
4	2	1	6	9	5	7	8	3
7	3	9	1	2	8	5	6	4
5	8	6	7	4	3	9	1	2
9	5	7	8	6	2	4	3	1
8	4	3	9	7	1	2	5	6
1	6	2	3	5	4	8	7	9

▷ rigkeitsgrad – üblicherweise in den Kategorien »leicht«, »mittel«, »schwer« oder »höllisch« – korrekt einzustufen.

Während in der Frühzeit die Aufgaben von Hand erzeugt wurden, werden heute fast alle von Programmen entworfen, die gemäß der folgenden Idee funktionieren: Man setzt zufällig eine gewisse Anzahl von Zahlen in das Schema und wendet darauf einen Lösungsalgorithmus an. Hat die Aufgabe eine eindeutige Lösung, ist man fertig. Lässt die zufällig erzeugte Verteilung keine Lösung zu, entfernt man eine Zahl und fängt von vorne an. Gibt es mehrere Lösungen, so wählt man eine aus und fügt der Anfangsverteilung mit Hilfe des Algorithmus neue Zahlen hinzu, bis die Lösung eindeutig wird.

Echte und elektronische Radiergummis

Die Lösung eines Sudoku-Gitters ist äquivalent zu einem Graphenfärbungsproblem. Die Knoten des Graphen sind die 81 Felder des Quadrats; zwei Knoten sind genau dann durch eine Kante verbunden, wenn die zugehörigen Felder zur selben Zeile, zur selben Spalte oder zum selben Kästchen gehören. Das macht pro Knoten $8+8+4=20$ Kanten: acht für die Zeile, acht für die Spalte und vier für die Felder des Kästchens, die nicht schon in derselben Zeile oder Spalte liegen. Insgesamt hat der Graph $81 \cdot 20/2 = 810$ Kanten. Es stehen neun Farben zur Auswahl, entsprechend den neun möglichen Belegungen für jedes Feld. Manche Knoten des Graphen sind bei Spielbeginn bereits gefärbt, und es gilt, die verbleibenden Knoten so zu färben, dass nirgends zwei durch eine Kante verbundene Knoten dieselbe Farbe tragen.

Kommen wir nun zu der Kunst, Sudokus von Hand zu lösen – eine Kunst, der sich Millionen begeisterter Spieler mit großer Hingabe widmen. Meine Empfehlung: Sammeln Sie zunächst eigene Erfahrungen und lesen Sie erst dann Lösungsrezepte – wenn überhaupt. Es hat seinen eigenen Reiz, zum Lösen von Sudokus nur selbst entwickelte Methoden zu verwenden.

Für diejenigen Leser, die nicht wissen, wie sie anfangen sollen, hier zwei Grundprinzipien. Erstens: Suchen Sie stets diejenigen Felder, die den stärksten Einschränkungen unterliegen, also solche, die in einer Zeile, einer Spalte oder einem Kästchen mit vielen bereits belegten Feldern liegen. Mit etwas Glück legen die verschiedenen Einschränkungen (»Das Feld kann keine Eins oder Drei oder Sieben enthalten, da diese Zahlen in der zugehörigen Spalte schon vorkommen«) die einzutragende Zahl bereits eindeutig fest (Methode 1 im Kasten S. 102/103).

Zweitens: Finden Sie in einer Zeile, einer Spalte oder einem Kästchen den hoffentlich einzigen Platz, auf den eine bestimmte Zahl passt (Methode 2).

Weitere Lösungsstrategien harren ihrer Entdeckung. Sie alle zugleich einzusetzen gibt dem Lösungsprozess Tempo und trägt zum Vergnügen bei.

Einige Websites erzeugen Aufgaben mit einem Schwierigkeitsgrad nach Wunsch und leisten Hilfestellung beim Lösen, ohne dem Benutzer die eigentliche Denkarbeit abzunehmen. So kann man an manchen Stellen Einträge in Felder vornehmen und wieder löschen, was einem Bleistift und Radiergummi erspart. Andere Programme zeigen sogar logische Verbindungen zwischen den Feldern auf. Puristen mögen solche Hilfsmittel verabscheuen; ich halte das für übertrieben. Immerhin ist dadurch der Kopf, von der niedrigen Tätigkeit des Radierens entlastet, frei für die kühnsten Gedankenflüge.

Wenn Sie der klassischen Aufgaben müde sind, können die unzähligen Variationen des Sudoku Sie vielleicht noch reizen. Einige bestehen aus mehreren überlappenden Quadraten, bei anderen treten merkwürdig geformte Bausteine an die Stelle der Kästchen, wieder andere verwenden Farben (Kasten S. 105). Diese Varianten sind interessant, weil sie einen dazu zwingen, immer neue Überlegungen anzustellen. Ein Spielbegeisterter, der für ein traditionelles Sudoku nur eine Viertelstunde benötigt, kann sich mit gigantischen Varianten mehrere Tage lang den Vergnügungen des Kombinierens hingeben. »Wer ist stärker? Ich oder dieses lumpige Zahlenquadrat?« ◁

Jean-Paul Delahaye ist Professor für Informatik an der Universität Lille.

Einsame Hunde. Die schönsten Sudokus aus Japan. Von Jean-Claude Lin (Hg.). Freies Geistesleben, Stuttgart 2005

Mehr einsame Hunde. Die schönsten Sudokus aus Japan. Von Jean-Claude Lin (Hg.). Freies Geistesleben, Stuttgart 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATUR

Peilung mit der Zunge

»Als die Ultraschallpeilung der Flughunde entdeckt wurde, mußte naturgemäß auch die Frage nach dem Entstehungsort der Orientierungslaute gestellt werden … Zur Klärung dieser Frage durchtrennte ich einzeln und in Gruppen die Kehlkopfnerven von Nilflughunden … Nach Durchtrennung sämtlicher Nerven des Kehlkopfes erzeugten die Versuchstiere normale Orientierungslaute … Nach Durchschneiden des Unterzungennervs erlosch die Fähigkeit zur Erzeugung der Peillaute sofort … Bei Nilflughunden werden die Orientierungslaute also durch ›Zungenschlag‹ erzeugt.« *Die Naturwissenschaften, 43. Jg., Nr. 5, S. 117–118, März 1956*

Mehrfarbige Farben

»Die mehrfarbige Farbe ist zwar ein logischer Widerspruch – die Praxis beweist jetzt jedoch, daß die bisherige Ansicht offenbar nicht stimmt: Chemikern von Du Pont ist es gelungen, auf der Grundlage eines Acryl-Monomeren als Lack und mehrerer Metallpulver als Pigmente eine Farbe zu entwickeln, die je nach dem Standpunkt des Betrachters in anderer Färbung erscheint. Damit ergibt sich die Möglichkeit, daß beispielsweise ein an einem Beobachter vorüberfahrender Kraftwagen, der mit einem solchen Lack gestrichen ist, während der Bewegung eine jeweils andere Farbe annimmt.« *Chemiker-Zeitung, 80. Jg., Nr. 5, S. 143, März 1956*

▶ Sobald ein Unbefugter das ›Alarmobil‹ berührt, fällt es um und es ertönt ein Alarm.

Mobile Sicherheit

»Das ›Alarmobil‹ enthält einen Wecker, eine Taschenlampenbatterie und einen Kontakt, also eine komplette elektrische Warnanlage, so daß ein einziges Gerät wahlweise verschiedene Stellen beschützen kann. Die Bodenfläche des ›Alarmobils‹ ist so klein gehalten, daß es schon bei geringem Anstoß umfällt und dabei den Alarmkontakt schließt … Auf der Oberseite ist ein kleiner Knopf zur Befestigung eines Fadens angebracht, so daß man vor geöffneten Parterre-Fenstern oder um das Zelt beim Camping eine Schranke aufbauen kann. Jede Berührung mit dem gespannten Faden wirft den Apparat um und läßt den beachtlichen Lärm ertönen.« *Die Umschau, 56. Jg., Heft 5, S. 155, März 1956*

Tragbar in allen Lagen

»Bei Unglücksfällen in Bergwerken und dergleichen macht es sich oft nötig, den Verletzten mehrfach umzupacken, weil der Transport bald waagerecht, bald senkrecht erfolgen muss. Es ist dies nicht nur äusserst schmerzhaft für den Verletzten, sondern vor allem auch zeitraubend und sehr umständlich. Um hierin eine Verbesserung zu schaffen, ist von Herrn M. von Schroeder die durch die Abbildung veranschaulichte Tragbahre konstruiert worden … Der Kranke wird mittelst der Gurte und Riemen auf die Bahre in ausgestreckter Lage aufgeschnallt, sodass er, sowohl in horizontaler Lage als in reitender Stellung, senkrecht transportiert werden kann.« *Neueste Erfindungen in Bild und Wort, Nr. 15, S. 204, März 1906*

◀ Tragbahre zum senkrechten Transport von verunglückten Bergleuten

Affige Schüler

»Der englische Erforscher der Affensprache, Professor Garner, hat sich in neuerer Zeit darauf gelegt, Affen Schulbildung beizubringen. Die Ausbildung dieser uns so nahe verwandten Tiergattung ist seiner Meinung nach zu Unrecht arg vernachlässigt worden. Da die Schimpansen, auf die er es in erster Reihe abgesehen hat, nicht zu ihm nach London kommen, um sich unterweisen zu lassen, hat er ihnen eine Schule im Urwald errichtet …

Einen Schimpansen brachte er dazu, das französische Wort für ›Feuer‹ zu erlernen, d. h. diesen Begriff mit dem Worte ›feu‹ zu verbinden. Ein Weibchen lehrte er mit viel Mühe die Unterschiede zwischen Kreisen, Vierecken und Dreiecken.« *Himmel und Erde, 18. Jg., Nr. 3, S. 141–142, März 1906*

Frische Luft für gerade Knochen

»Rachitis, die bei uns auch »Englische Krankheit« bezeichnet wird … ist äusserlich besonders an der Verkrümmung der Knochen, langsamem Wachstum der Zähne etc. erkenntlich. Einige Forscher haben sich auf den Standpunkt gestellt, dass es sich um eine Infektionskrankheit handle. Diese Auffassung ist nach dem Berliner Pathologen von Hansemann nicht richtig. Die Beobachtungen an Tieren, es handelt sich nur um solche, die in der Gefangenschaft leben, denn nur bei diesen kommt Rachitis vor, lassen es wahrscheinlich erscheinen, dass die Rachitis eine Folge ungenügender Bewegung und des Mangels an Luft ist.« *Die Umschau, 10. Jg., Nr. 13, S. 254, März 1906*

Fluch und Segen spekulativer Theorien

Physiker erfinden Theorien, die zunehmend bizarr erscheinen und sich experimentell kaum mehr verifizieren lassen. Dennoch sind es solche Theorien, die das Wissen über die Natur voranbringen.

Von Carlo Rovelli

Neulich wurde ich nach einem Seminar mit Fragen bedrängt: »Ihr theoretischen Physiker«, wollten die Studenten wissen, »sprecht vom Raum, der aus einer Folge von Schleifen besteht, von zusätzlichen Dimensionen, von Paralleluniversen und von mikroskopischen Strings, aus denen die Materie aufgebaut ist. Muss man das alles glauben?«

Zweifellos: Die Grundlagenphysik entfernt sich von unserer alltäglichen Weltsicht und wird somit für viele unbegreiflich. Das wirft Fragen auf: Welche Realitäten rechtfertigen solche Theorien, wenn sie nicht mehr durch unmittelbare Erfahrungen bestätigt werden können? Welchen erkenntnistheoretischen Wert besitzen ihre Naturbeschreibungen? Welches Wissen über die Natur bieten sie uns an, und mit welcher Sicherheit ist dieses verbunden? Hat Einstein die Grundlagenforschung auf einen Weg geführt, der sich von unserem Alltag immer weiter entfernt und auf dem Erfahrungen ihren Wert verlieren?

»Oft sind Mitteilungen von Naturwissenschaftlern falsch«

Oft sind die Mitteilungen von Naturwissenschaftlern falsch. Fasziniert von ihren Ideen, unterscheiden die Theoretiker in ihren Ausführungen häufig nicht präzise zwischen bestätigten und spekulativen Theorien. Dabei gilt eine Theorie natürlich erst dann als etabliert, wenn mehrere Experimente ihre spezifischen Vorhersagen verifiziert haben.

Der bisweilen etwas locker gehandhabte Unterschied zwischen bestätigten und spekulativen Theorien unterliegt einer ständigen Entwicklung. Das macht ihn aber nicht weniger wichtig: Die Quantenmechanik (zusammen mit der Quantenfeldtheorie, also ihrer Anwendung auf physikalische Felder), das Standardmodell der Elementarteilchen sowie die Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins sind heute etablierte Theorien. Fügen wir dieser Liste ältere Theorien wie Klassische Mechanik oder Elektrodynamik hinzu. Auch diese Theorien haben sich bestätigt, sie bilden sogar die Basis der modernen Technik. Auf ihre Vorhersagen können wir (in ihrem jeweiligen Geltungsbereich) Geld und Leben wetten.

Alles, was über diesen Rahmen hinausgeht, bleibt spekulativ: Quantengravitation, Stringtheorie, nichtkommutative Geometrien, vereinheitlichte Theorien für die physikalischen Fundamentalkräfte, Supersymmetrie, Universen mit zusätzlichen Raumdimensionen, Multiversen (auch fast alle meine eigenen Forschungsarbeiten). Nichts garantiert, dass diese Hypothesen die Welt korrekt beschreiben; sie besitzen keinerlei experimentelle Absicherung, auch wurden sie niemals konkret angewendet und nur ein Verrückter würde es wagen, auf die Korrektheit ihrer Vorhersagen zu setzen. Und dennoch arbeiten seit Jahrzehnten Tausende von Forschern an solchen spekulativen Konstruktionen wie etwa der Stringtheorie.

Vorsicht vor eigenen Ideen!

Aus dem Gesagten folgt nicht, all diese Theorien wären uninteressant. Auch die heute etablierten Theorien waren einst spekulativ und ungesichert. Aber wir wissen nicht, ob Theorien, die heute untersucht werden, zutreffend sind. Es wäre nicht das erste Mal, dass eine Hypothese, die von einer großen Zahl von Forschern verwendet wird und deren Leidenschaft erregt, sich im Lichte künftiger Tatsachen als Irrweg erweist (man denke nur an das Phlogiston des 18. Jahrhunderts oder den Äther im 19. Jahrhundert).

Vielleicht ist die Lösung großer offener Probleme, wie die Vereinigung von Allgemei-

STEFANO BERNA

Die Verwirrung durch komplizierte Räume und unbekannte Umgebungen ist auch für die Kunst ein Dauerthema. Hier ein Objekt von Stefano Berna: Der Mensch in der fremden Welt (L'uomo nel mondo strano), Italien, 1994

ner Relativitätstheorie und Quantenmechanik, ja sogar bereits bekannt und muss nur noch verifiziert werden. Vielleicht findet aber auch ein junger unbekannter Einstein, der noch nicht einmal eine Anstellung als Forscher hat, bald die korrekte Theorie?

Jeder Forscher besitzt Ideen und Überzeugungen – so wie ich die meinigen – und jeder soll seine Hypothesen mit Begeisterung und Energie verteidigen. Eine angeregte Diskussion ist noch immer das beste Mittel, um Wissen hervorzubringen. Allerdings darf uns die Verteidigung der eigenen Ideen nicht blind machen – wir könnten nämlich Unrecht haben. Die Erfahrung entscheidet und nicht etwa Mehrheiten oder geschickte Dialektik.

Mathematik ist korrekt, wenn sie keine Widersprüche enthält. Die Physik muss aber zusätzlich die Wirklichkeit erklären. Naturwissenschaftler präsentieren jedoch ihre Hypothesen oft so, als seien diese bereits gesicherte Entdeckungen. Das ist nicht gerechtfertigt, vor allem nicht gegenüber einer Gesellschaft, die unsere Forschungen finanziert. Fehlende Klarheit hinsichtlich des hypothetischen Charakters von vorgeschlagenen Theorien diskreditiert die Wissenschaft.

Beispielsweise wurde gerade die Stringtheorie mehrfach so dargestellt, als sei sie bereits experimentell bestätigt. Auch habe ich den Eindruck, als würde sich die Verwechslung von bestätigten und spekulativen Theorien in der Wissenschaftlergemeinde ausbreiten. Diese Verwirrung wirkt sich besonders schädlich auf die Ausbildung junger Wissenschaftler aus. Kürzlich unterhielt ich mich bei einer internationalen Konferenz mit einem brillanten Nachwuchsforscher. Unsere Debatte drehte sich um zwei Theorien: die Allgemeine Relativitätstheorie und die so genannte Yang-Mills-Theorie der Supersymmetrie mit N = 4.

Als ich erwähnte, dass nur eine dieser beiden Theorien bestätigt sei, fragte mich der junge Forscher ganz unschuldig: »Welche denn?« Er kokettierte nicht etwa; er verstand offenbar nicht den physikalischen Unterschied zwischen der Allgemeinen Relativitätstheorie, die eine große Zahl experimentell längst bestätigter Vorhersagen lieferte, und einer Theorie, die nichts dergleichen aufzuweisen hat. Diese Vermischung sorgt in den Grundlagen der Physik oft für Konfusionen. Klarheit über die Theorie der Strings und über all das, was man in Fachkreisen »jenseits des Standardmodells« nennt, ist wesentlich für eine gesunde Wissenschaft und eine deutliche Kommunikation mit der Öffentlichkeit.

Nachdem ich den hypothetischen Charakter moderner Theorien betont habe, will ich nun die These verteidigen, dass solche radika- ▷

len wissenschaftlichen Hypothesen trotzdem legitim sind. Gewiss sind sie spekulativ, aber die Theoretiker haben nichts Besseres, um die Welt auch jenseits dessen zu begreifen, was wir gerade wissen. Wenn die Welt in diesen Theorien fremdartig erscheint, ist das ein Fehler weder der Welt noch der Forscher noch eines neuen wissenschaftlichen Stils, wie ihn Einstein eingeführt hat. Nein, das ist nur ein Fehler unserer naiven Alltagstheorien.

Einstein war nicht der Erste, der unsere Sicht auf die Welt tief greifend verändert hat. Viele haben dies vor ihm gemacht, sogar noch revolutionärer als er: Kopernikus und Galilei etwa haben jedermann davon überzeugt, dass die Erde unter unseren Füßen mit einer Geschwindigkeit von 33 Kilometer pro Sekunde durchs All eilt; Faraday und Maxwell haben den Raum mit elektrischen und magnetischen Feldern aufgefüllt; und von Darwin haben wir gelernt, dass wir gemeinsame Vorfahren mit dem Marienkäfer haben.

Naturwissenschaft ist eine ständige Suche nach neuen Denkmöglichkeiten für die Welt. Forscher ringen laufend darum, uns von unseren zahlreichen Vorurteilen zu befreien und bessere Weltsichten zu entwickeln, die korrekter und effizienter sind.

»Naturwissenschaft ist eine ständige Suche nach neuen Denkmöglichkeiten«

Im Raum schwimmen, ohne zu fallen

Der erste uns bekannte Naturwissenschaftler, vielleicht auch einer der größten, war Anaximander. Er lebte im 7. Jahrhundert v. Chr. in Milet, das in der heutigen Türkei lag. Der Grieche war es, der als Erster verstand, dass die Welt nicht nur aus der Erde unter uns und dem Himmel über uns besteht, sondern dass die Erde ein Körper von endlicher Ausdehnung ist, der im Raum schwimmt, ohne zu fallen und ohne sich auf etwas anderes zu stützen. Ist das nicht eine beunruhigende Idee (warum fällt die Erde nicht?), obwohl – selbstverständlich – völlig korrekt?

In diesem kontinuierlichen Prozess, in dem das Bild der Welt immer wieder neu erstellt wird, hat sich auch die Substanz der Welt – oder genauer gesagt unsere Art, sie zu sehen – immer wieder verändert. Anaximander stand am Anfang dieses ungewöhnlichen Abenteuers: Um die Phänomene zu erklären, führte er ein Gebilde ein, das er »Apeiron« nannte (manche Autoren übersetzen dies mit »das, was keine Unterschiede aufweist, das Indefinite« und andere mit »das Unbegrenzte«). Das Apeiron war das erste theoretische Objekt, sozusagen der Urahn von Atomen, Elementarteilchen, physikalischen Feldern, gekrümmten Raumzeiten, Quanten, Strings sowie von Schleifen, mit deren Hilfe wir uns die Welt heute vorstellen.

Dieser revolutionäre Ansatz, der in radikal neue Weltsichten mündete, wurde also nicht erst von Einstein erfunden. Er bildet vielmehr ein Kennzeichen jeder großer Wissenschaft. Einstein fiel nur die Rolle zu, die Grundlagenforschung zu seiner Zeit aus einer gewissen bequemen Selbstsicherheit zu erwecken, die sich als Folge der ungeheuren Erfolge Newtons eingestellt hatte. Diese verleiteten zu der Annahme, die Newton'schen Gesetze hätten bereits einen Schlussstrich unter die Erkenntnis über die Welt gesetzt: welche Naivität!

Sind neue Weltsichten gut bestätigt, werden sie zu Allgemeingut. Auch die Tatsache, dass die Zeit in einem Satelliten und auf der Erde im Vergleich unterschiedlich schnell abläuft, wird eines Tages allgemein bekannt sein; die frühere Idee, die Zeit sei überall absolut dieselbe, wird einmal ähnlich lächerlich wirken wie die Vorstellung, die Erde brauche eine Stütze, um nicht abzustürzen. Ich möchte auch den Eindruck revidieren, die Erfahrung habe in der Arbeit Einsteins nur eine untergeordnete Rolle gespielt und seine Entdeckungen seien ausschließlich Resultate des reinen Denkens gewesen.

Es stimmt, dass gewisse Entdeckungen Einsteins sich nur wenig auf empirische Befunde stützten. Während sich die Quantenmechanik unweigerlich aus der Messung von Atomspektren ergab, schien die Allgemeine Relativitätstheorie ausschließlich eine Schöpfung von Einsteins abstrakten Spekulationen zu sein. Beim Nachdenken über die Natur des Raums folgert das schwäbische Genie, dass der Raum gekrümmt sei, und berechnet die Ablenkung des Sternlichts während einer Sonnenfinsternis – und bekommt Recht! Jedenfalls hat Einstein – und das vermindert sein Genie in keiner Weise – seine Theorien nicht aus dem Nichts gezaubert. Vielmehr hat er sich mit den scheinbaren Widersprüchen in den damals etablierten Theorien befasst. Im Fall der Speziellen Relativitätstheorie mit dem Konflikt zwischen der so genannten Galilei-Transformationen und der Maxwell'schen Theorie; im Falle der Allgemeinen Relativitätstheorie mit der Diskrepanz zwischen der Newton'schen Gravitationstheorie und der Speziellen Relativitätstheorie.

Einstein nahm die physikalischen Theorien seiner Zeit also durchaus ernst, konzentrierte sich auf ihre Widersprüche und benutzte sie, um eine neue Sicht zu finden, welche die alte als Spezialfall mit enthielt. Die vorhandenen Theorien spielten für Einstein die Rolle von Erfahrungstatsachen, die zu strukturieren er sich vornahm – genau so, wie Kepler und Galilei einst die Basis für Newton lieferten.

Weit davon entfernt, reine Spekulationen zu sein, waren die Entdeckungen Einsteins wie jene von Newton fest in der Empirie verankert, selbst wenn die fraglichen Erfahrungstatsachen bereits im Rahmen vorhandener Theorien erklärt wurden. Einstein war ein herausragender Denker; indem er aber unsere klassische Weltsicht umstürzte, veränderte er nicht das Wesen der Naturwissenschaft, sondern fachte nur wieder die Flamme der Erkenntnis an.

Vielleicht übertreiben wir heutzutage, wenn wir selbst kühnste Hypothesen überprüfen – vor allem dann, wenn sie nicht so abgesichert sind wie jene Einsteins. Es bleibt uns aber nichts anderes übrig, als zu versuchen offene Probleme zu lösen, indem wir neue Ideen und Weltsichten einführen. Das ist nicht nur legitim, sondern oft unsere einzige Chance, die Welt besser zu verstehen.

Die durch Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik eingeleitete wissenschaftliche Revolution hat ihr Ziel noch nicht erreicht, da eine neue einheitliche Sicht auf die Welt, die beides umfasst, noch nicht gefunden wurde. Bislang wissen wir nur, dass das angepeilte neue Weltbild deutlich anders aussehen wird als unser bisheriges. Der Physiker Wolfgang Pauli, ein genialer Querdenker, hat einmal von einer Theorie, die man ihm schilderte, gesagt, sie könne gar nicht wahr sein, da sie nicht verrückt genug sei.

Kein anderes Wissen der Menschheit verdient so viel Vertrauen wie das der Naturwissenschaft. Wenn uns Astronomen versichern, im nächsten Monat gäbe es eine Sonnenfinsternis, können wir darauf wetten, dass sie Recht behalten. Natürlich könnte bis dahin auch ein Neutrinostern fast mit Lichtgeschwindigkeit auf uns zurasen und uns den Mond entreißen. Aber das ist wenig wahrscheinlich. Können wir uns also stets darauf verlassen, dass das, was die Naturwissenschaft von der Welt behauptet, auch wahr ist? Keine spekulative Theorie kann Tatsachen, die sie widerlegt, standhalten. Ist damit schon das Bild, das uns eine bestätigte Theorie von der Welt zeichnet, ohne jeden Zweifel wahr?

Die verblüffende Effizienz des ptolemäischen Modells

Offenkundig nicht. Alle naturwissenschaftlichen Theorien wurden irgendwann einmal durch bessere ersetzt. Das galt selbst für die nützlichsten Theorien. So ist etwa die Güte des ptolemäischen Modells verblüffend: Wir können heute noch das vor 1900 Jahren geschriebene Buch des griechischen Astronomen aufschlagen und dessen Tabellen dazu verwenden, die Position der Venus am Himmel im nächsten Monat präzise vorherzusagen. Dennoch wird die Welt durch die Epizykel und Deferenten von Ptolemäus nur sehr umständlich dargestellt. Noch erstaunlicher ist der Erfolg der Newton'schen Theorie, die von unseren Ingenieuren tagtäglich benutzt wird, um Brücken oder Flugzeuge zu konstruieren. Gleichwohl liefert Newtons Raum keine perfekte Beschreibung der Welt.

Wie steht es mit Theorien, deren Vorhersagen bislang noch nicht in Widerspruch zur Erfahrung stehen, wie etwa mit der Allgemeinen Relativitätstheorie? Auch sie liefert einige unvernünftige Vorhersagen. So sagt sie zum Beispiel voraus, dass im Zentrum Schwarzer Löcher oder am Beginn der Expansion des Universums gewisse physikalische Größen unendlich groß werden. Schwerer noch wiegt ▷

Wolfgang Pauli an der Hand seiner Mutter

Wie das Neutrino in die Physik kam

Es gibt einige historische Beispiele dafür, dass die Bestätigung einer Vorhersage lange auf sich warten lässt. 1930 behauptete der in Wien geborene Physiker Wolfgang Pauli – hier vor der Tafel stehend – die Existenz eines neuen Teilchens, um die Nichterhaltung der Energie beim radioaktiven Zerfall zu erklären. Der Nachweis dieses Teilchen war sehr schwierig. So zweifelte selbst Pauli, dass dies jemals möglich sein würde. 1933 gab Fermi dem imaginären Teilchen den Namen Neutrino. Erst im Jahr 1955 gelang es Frederick Reines und Clyde Cowan, die Existenz der Neutrinos nachzuweisen. Das macht eine Wartezeit von 25 Jahren. Das kleine Bild (oben) zeigt Pauli an der Hand seiner Mutter 1901, im Alter von etwa einem Jahr, 29 Jahre vor dem Zeitpunkt, zu dem er die Existenz der Neutrinos postulierte.

AIP, EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES

»Nichts ist überzeugender, als sich den Raum gekrümmt vorzustellen«

▷ die Unverträglichkeit zwischen Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik. Sie ähnelt den Widersprüchen zwischen den etablierten Theorien, die einst Einstein zu seinen neuen Hypothesen anregten. So geht die Quantenmechanik davon aus, dass die Geschwindigkeit, mit der die Zeit vergeht, nicht von der Materie beeinflusst wird; das widerspricht jedoch der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Manche träumen von einer »endgültigen« Theorie, die eines Tages gefunden wird – eine trügerische Hoffnung. Unser Nichtwissen über die Natur ist enorm und die offenen Probleme in den Grundlagen der Physik sind derart fundamental, dass ich nicht glaube, das Ende des Wegs sei schon in Sicht.

Nicht die Gewissheit, sondern der Zweifel lässt uns weiterkommen

Warum aber ist die Naturwissenschaft dann vertrauenswürdig? Nicht deshalb, weil sie uns sagt, gewisse Dinge seien wahr, sondern weil ihre Antworten die besten sind, die wir besitzen. Das ist fast Definitionssache: Erscheint eine bessere Antwort, so ist eben diese neue Antwort ab sofort die »wissenschaftliche«. So war die Newton'sche Physik bis hin zu Einstein synonym mit der Naturwissenschaft. Als dieser ein besseres Bild der Welt entdeckte, in dem der Raum gekrümmt, die Zeit nicht überall gleich ist und das Licht aus Photonen besteht, wurde deswegen die Newton'sche Lehre keineswegs als unwissenschaftlich abgetan. Ganz im Gegenteil sind wir auch heute noch davon überzeugt, dass sie zu ihrer Zeit eine bemerkenswerte naturwissenschaftliche Theorie gewesen ist.

Das naturwissenschaftliche Denken weiß um unsere Unkenntnis der Natur und damit um die Dynamik unseres Wissens. Der Zweifel und nicht die Gewissheit ist es, der uns weiterkommen lässt. Darin verborgen liegt sicherlich das tiefe Erbe Descartes'. Wir müssen der Naturwissenschaft vertrauen – nicht weil sie uns Gewissheiten liefert, sondern weil sie uns keine gewährt.

Ich weiß nämlich keineswegs, ob der Raum wirklich gekrümmt ist, wie das die Allgemeine Relativitätstheorie behauptet (ich bin noch nicht einmal sicher, was das »wirklich« in meiner Aussage bedeutet). Aber mir ist bis heute keine physikalische Sicht der Welt bekannt, die überzeugender wäre als diejenige, sich den Raum »gekrümmt« vorzustellen.

Andere Weltsichten stellen die Komplexität unserer Welt weniger zuverlässig dar. Das Bewusstsein um die Begrenztheit unseres Wissens begründet die naturwissenschaftliche Methode, die – zumindest in ihrer idealen Version – auf Diskussion und Dialog aufbaut. Alle Ideen sind unterschiedlich, aber jeder weiß, dass er prinzipiell Unrecht haben kann. Folglich muss jeder offen sein für neue Lösungen. Die Leidenschaft, mit der jeder Naturwissenschaftler an seine eigenen Ideen und Hypothesen glaubt und mit der er diese verteidigt, darf ihn nicht daran hindern, sich auch für alternative Erklärungsversuche zu interessieren oder für eine Widerlegung durch die Erfahrung.

Eine vernünftige Erforschung der Welt beruht auf der Idee, dass Erkenntnisse über sie nicht auf der Hand liegen. Das Wissen über die Welt kann aber durch Beobachtung sowie durch vernünftige Konfrontation von Ideen und Hypothesen vergrößert werden: also durch Diskussion und Dialog über eine vernünftige Interpretation der Fakten.

Diese Idee ist derjenigen der Demokratie sehr nahe. Darin werden – im Prinzip jedenfalls – Entscheidungen nicht auf der Basis von gewonnenen Gewissheiten getroffen, sondern aus der Diskussion zwischen Vertretern unterschiedlicher Ansichten. Jeder verteidigt zwar seine Sicht der Dinge, ist aber grundsätzlich auch bereit, seine Meinung zu ändern. Nicht zufällig sind Naturwissenschaft und Demokratie zur gleichen Zeit und am gleichen Ort geboren worden – nämlich vor 2500 Jahren in Griechenland.

Das Vertrauen der Gesellschaft in naturwissenschaftliche Erkenntnisse hat sich in den letzten Jahrzehnten verringert. Die Verteidigung des naturwissenschaftlichen Denkens und damit der Klarheit über seine Grenzen und die Gründe, warum man an sie »glauben« soll, ist daher noch wichtiger geworden. Das betrifft zugleich die Verteidigung von Rationalität, Zweifel und Dialog – gegen die gefährlichen Gewissheiten von Irrationalismus und Fanatismus, gegen die Gewissheiten und die Arroganz der Macht.

Naturwissenschaftler sollten keine Gewissheiten verkünden, über die sie nicht verfügen. Aber ich möchte dennoch die große Bedeutung auch des spekulativen Denkens für die Zivilisation betonen. Denn es lässt uns die Welt verstehen, diese immer wieder neu erfinden, hilft dabei, uns neue Welten vorzustellen – und das alles mit Respekt voreinander und im Dialog miteinander. Genau so, wie uns das Albert Einstein einst vorgemacht hat.

Meine Antwort auf die eingangs gestellte Frage ist also komplex: Nein, man muss nicht alles glauben, was die entfesselte Einbildungskraft der Physiker uns vorschlägt. Dennoch schreitet unser Wissen nur dank dieser Einbildungskraft voran. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Carlo Rovelli ist Physikprofessor an der Université de la Méditerranée in Marseille und Mitglied des Institut Universitaire de France. Er erhielt unter anderen den internationalen Wissenschaftspreis Xanthopoulos.

Brian Greene: Das elegante Universum. Goldmann, 2006

Simon Singh: Big Bang. Hanser, 2004

Stephen W. Hawking: Das Universum in einer Nussschale. dtv, 2004

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Echo der Schwarzen Löcher

Das Verhalten von Schallwellen in einer Flüssigkeit ähnelt auf verblüffende Weise der Lichtausbreitung in einer gekrümmten Raumzeit. Lassen sich im Labor akustische Modelle Schwarzer Löcher herstellen und damit Phänomene der Quantengravitation untersuchen?

KENN BROWN

WEITERE THEMEN IM APRIL

Schuh oder Bild vom Schuh?

Dass ein Ding, das auf ein Ding verweist, und dieses andere Ding verschiedene Dinge sind, müssen kleine Kinder erst mühsam lernen

RANDY HARRIS

FOTO: RANDY HARRIS; FOTOMONTAGE: JEN CHRISTIANSEN

Bekämpfung der Malaria

Bis 2010 soll die Zahl der Malariatoten halbiert werden. Schon die heutigen Möglichkeiten der Vorbeugung und Behandlung könnten uns diesem Ziel entscheidend näher bringen – wenn die Welt sie nur anwenden würde

Lehren aus dem Tsunami

Die Tsunami-Katastrophe von 2004 hat viele neue Erkenntnisse über die Monsterwellen geliefert. Zusammen mit effizienten Vorwarnsystemen sollten sie künftig Leben retten helfen

WOOD RONSAVILLE HARLIN INC., MATTHEW FREY